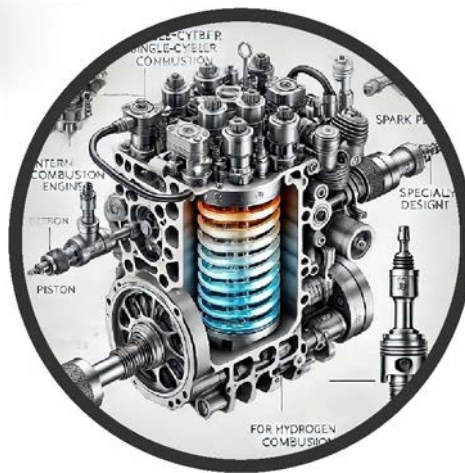




ΤΜΗΜΑ: Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΤΙΤΛΟΣ: Μελέτη Και Σχεδιασμός Μονοκύλινδρης Μηχανής
Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ:

Κρόκου Παναγιώτα Α.Μ: 2919104

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ζαούτσος Στέφανος

Λάρισα 2023



Ευχαριστίες

Η πτυχιακή εργασία με θέμα «**Μελέτη Και Σχεδιασμός Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου**» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών του τμήματος «**Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας**» του **Πανεπιστημίου Θεσσαλίας** το έτος **2023**.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασία, για τη συνεχή καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη και τις ουσιαστικές συμβουλές του. Επίσης για τη συνεχή υποστήριξη και ενθάρρυνση που μου παρείχε σε όλη αυτή την περίοδο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την κατανόηση και τη βοήθειά τους στην εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας.



Περίληψη

Αυτή η εργασία εξετάζει το καύσιμο του υδρογόνου για μονοκύλινδρους κινητήρες εσωτερικής καύσης (H_2 -ICE) και τη σημασία του στη μείωση της σπατάλης ενέργειας και των εκπομπών. Το υδρογόνο θεωρείται ένα από τα πιο πολλά υποσχόμενα εναλλακτικά καύσιμα επειδή μπορεί να καίει χωρίς να παράγει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), που προκαλεί υπερθέρμανση του πλανήτη.

Για μονοκύλινδρους κινητήρες υδρογόνου εσωτερικής καύσης, η διαδικασία είναι η ίδια όπως και για τους συμβατικούς κινητήρες. Ακολουθεί τους τέσσερις κύκλους: εισαγωγή, μετά συμπίεση και ισχύς που τελειώνει με έναν κύκλο εξάτμισης. Ωστόσο, η χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου συνεπάγεται σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις. Απαιτεί εξειδικευμένα συστήματα αποθήκευσης και διανομής για το καύσιμο, όπως δεξαμενές υψηλής πίεσης και ειδικά μπεκ για να διασφαλιστεί ότι δεν πραγματοποιείται προανάφλεξη και επίσης ασφάλεια και απόδοση του κινητήρα.

Ένα βασικό πλεονέκτημα του υδρογόνου ως καυσίμου είναι η υψηλή ενεργειακή του πυκνότητα. Η ταχεία καύση και η πλήρης μετατροπή επιτρέπουν στους μονοκύλινδρους κινητήρες υδρογόνου να επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση, επειδή μειώνουν τις απώλειες θερμότητας (στις οποίες μειώνονται οι αναλογίες επιφάνειας/όγκου) αυξάνουν τελικά την απόδοση του συστήματος.

Από την άλλη πλευρά, η αποθήκευση και ο χειρισμός του υδρογόνου είναι προβληματικοί. Λόγω της χαμηλής ενεργειακής του πυκνότητας ανά όγκο, το υδρογόνο απαιτεί συνθήκες αποθήκευσης σε υψηλή πίεση, καθιστώντας έτσι την ανάγκη για ανθεκτικά και ασφαλή υλικά και συστήματα αποθήκευσης πολύ υψηλή. Επίσης σημαντικό για τη διαχείριση ροής υδρογόνου και τον ακριβή χρονισμό ανάφλεξης για την αντιμετώπιση της προανάφλεξης ως τρόπο διασφάλισης της ασφαλούς λειτουργίας του κινητήρα.

Λέξεις κλειδιά: Μονοκύλινδρη μηχανή εσωτερικής καύσης, Υδρογόνο, Καύση υδρογόνου, Ενεργειακή αποδοτικότητα.





Abstract

This paper examines hydrogen fuel for single-cylinder internal combustion engines (H₂-ICE) and its importance in reducing energy waste and emissions. Hydrogen is considered one of the most promising alternative fuels because it can burn without producing carbon dioxide (CO₂), which causes global warming.

For single-cylinder hydrogen internal combustion engines, the process is the same as for conventional engines. It follows the four cycles: intake, then compression and power ending with an exhaust cycle. However, the use of hydrogen as a fuel entails significant technological challenges. It requires specialized storage and distribution systems for the fuel, such as high-pressure tanks and special injectors to ensure no pre-ignition and also engine safety and performance.

A key advantage of hydrogen as a fuel is its high energy density. Rapid combustion and complete conversion allow single-cylinder hydrogen engines to achieve high efficiency because they reduce heat losses (in which surface/volume ratios decrease) ultimately increasing system efficiency.

On the other hand, hydrogen storage and handling are problematic. Due to its low energy density per volume, hydrogen requires high pressure storage conditions, thus making the need for durable and safe storage materials and systems very high. Also important for hydrogen flow management and accurate ignition timing to address pre-ignition as a way to ensure safe engine operation.

Keywords: Single-cylinder internal combustion engine, Hydrogen, Hydrogen combustion, Energy efficiency.



Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Πίνακας Περιεχομένων.....	5
Πίνακας Εικόνων.....	7
Πίνακας Σχημάτων.....	7
Πίνακες.....	8
Εισαγωγή.....	9
1 Κεφάλαιο Υδρογόνο και Αυτοκίνητα υδρογόνου.....	10
1.1 Γενικά.....	10
1.2 Πώς παράγεται το υδρογόνο και τι επιπτώσεις έχει στο κλίμα.....	11
1.2.1 Πώς υποστηρίζει το υδρογόνο την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία.....	13
1.2.2 Πώς μπορεί το υδρογόνο να υποστηρίξει την ανάκαμψη, την ανάπτυξη και τις θέσεις εργασίας.....	13
1.3 Υβριδικό ή ηλεκτρικό, Ούτε – τα αυτοκίνητα υδρογόνου είναι το μέλλον και μια νέα κατηγορία.....	14
1.3.1 Ποια είναι η διαφορά μεταξύ του κινητήρα εσωτερικής καύσης H_2 και της κυψέλης καυσίμου H_2	15
1.3.2 Αυτοκίνητα εξοπλισμένα με μπαταρίες υδρογόνου.....	15
2 Κεφάλαιο Έρευνα για μονοκύλινδρο κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης.....	17
2.1 Σύγχρονη έρευνα για τη χρήση του υδρογόνου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.....	17
2.1.1 Εκπομπές Ρύπων.....	18
2.1.2 Προκλήσεις και προοπτικές.....	18
2.2 Παραγωγή υδρογόνου: μέθοδοι και αξιολόγηση.....	18
2.2.1 Παραγωγή Υδρογόνου με Ηλεκτρόλυση.....	19
2.2.2 Βασική αρχή της Ηλεκτρόλυσης.....	19
2.2.3 Διαδικασία ηλεκτρόλυσης.....	19
2.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της Ηλεκτρόλυσης.....	20
2.3 Παραγωγή Υδρογόνου με Αναμόρφωση Φυσικού Αερίου.....	21



2.3.1	Διαδικασία Αναμόρφωσης Φυσικού Αερίου.....	21
2.3.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Αναμόρφωσης Φυσικού Αερίου.....	22
2.4	Παραγωγή Υδρογόνου με Θερμοχημικές Μεθόδους.....	22
2.4.1	Διαδικασία Θερμοχημικής Διάσπασης του Νερού.....	23
2.4.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Θερμοχημικών Μεθόδων.....	24
2.5	Παραγωγή Υδρογόνου με Βιολογικές Μεθόδους.....	24
2.5.1	Διαδικασίες Βιολογικής Παραγωγής Υδρογόνου.....	25
2.5.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Βιολογικών Μεθόδων.....	26
2.6	Χημεία και Φυσική του Υδρογόνου.....	26
2.6.1	Φυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.....	27
2.6.2	Ιδιότητες Αερίου, Υγρού και Στερεού Υδρογόνου.....	27
2.6.3	Χημικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.....	29
3	Κεφάλαιο Μονοκύλινδρη Μηχανή Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	30
3.1	Βασικές αρχές λειτουργίας.....	30
3.2	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	32
3.2.1	Τεχνολογίες Καύσης.....	32
3.2.2	Χαρακτηριστικά Λειτουργίας.....	34
3.2.3	Οι παράμετροι του Υδρογόνου και η Επίδραση τους στην Απόδοση Καύσης μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	35
3.2.4	Οι παράμετροι του Υδρογόνου στην Ασφάλεια και στη Χρήση Υδρογόνου μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	39
3.2.5	Οι παράμετροι του Υδρογόνου στην διαχείριση του καυσίμου μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	40
3.2.6	Οι παράμετροι του Υδρογόνου για τον σχεδιασμό και υλικών κατασκευής μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	41
4	Κεφάλαιο Μέρη και Εξαρτήματα της Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	44
4.1	Μέρη της Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	44
4.1.1	Αναλυτική Περιγραφή των Εξαρτημάτων.....	44
4.1.2	Χρονισμός Ανάφλεξης μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	52
4.1.3	Στοιχεία του Συστήματος Καυσίμου μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου.....	56
4.1.4	Ισχύ και Κατανάλωση Καυσίμου μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου σε σύγκριση με τις άλλες συμβατικές Μηχανές εσωτερικής Καύσης.....	65



Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1 Υδρογόνο, Πηγή: https://e-mc2.gr/el/vivliothiki/eidikes-tehnologies-kai-efarmoges-special-technologies-and-innovative-applications-5	10
Εικόνα 1.2 Υδρογόνο - ο ισχυρότερος δεσμός, Πηγή: https://www.e-mc2.gr/en/node/796	12
Εικόνα 1.3 Περιβάλλον: Υδρογόνο, Οφέλη και Κίνδυνοι, Πηγή: http://artinews.gr	14
Εικόνα 1.4 Η πιθανότητα υδρογόνου, Πηγή: https://www.toyota.gr/electrified/fuel-cell-electric	16
Εικόνα 2.1 Μετάβαση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου;, Πηγή: https://www.liberal.gr/aytokinito/strofi-stoys-kinitires-esoterikis-kaysis-ydrogonoy	17
Εικόνα 2.2 Παραγωγή και ενέργεια υδρογόνου, Πηγή: https://hydrogenonline.gr/nea-gia-to-ydrogono/176-paragogi-kai-energeia-ydrogonou	18
Εικόνα 2.3 Συσκευή Hoffman, Πηγή: https://users.sch.gr/xbalasi/electrochem/sect04/page_peirama.html	20
Εικόνα 2.4 Μοριακή δομή ατόμου υδρογόνου, Πηγή: https://gr.dreamstime.com/	27
Εικόνα 3.1 Μηχανές υδρογόνου και εσωτερικής καύσης, Πηγή: https://www.pemptousia.gr/2012/12/idrogonο-ke-michanes-esoterikis-kafs/	31
Εικόνα 3.2 Τι είναι το υδρογόνο ICE; Επισκόπηση Hydrogen ICE, Πηγή: https://www.horiba.com/twn/automotive/applications/emissions-performance-and-durability/exhaust-emissions/hydrogen-ice/	32
Εικόνα 3.3 Κινητήρας θαύμα βάζει τέλος στο Diesel - Καίει υδρογόνο και φτάνει έως τα 4.800 κ. εκ., Πηγή: https://www.carandmotor.gr/nea/kinitiras-4800-kek-kaiei-ydrogono-anti-gia-diesel	34
Εικόνα 3.4 EGR VALVE, ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ, Πηγή: https://autoalvanoudis.gr/egr-valve-anakyklosi-kafs aerion/	37
Εικόνα 3.5 Κινητήρες υδρογόνου: Η καινοτομία, μονόδρομος για τις ιαπωνικές φιλοδοξίες, Πηγή: https://www.naftikachronika.gr/2024/01/10/kinitires-ydrogonou-i-kainotomia-monodromos-gia-tis-iaponikes-filodoxies/	41
Εικόνα 4.1 Οχήματα κυψελών καυσίμου: ένα σημαντικό βήμα προς τη διάδοση, Πηγή: https://www.pemptousia.gr/2017/02/aftokinita-me-kipseles-kafsimou-ena-simantiko-vima-gia-ti-diadosi-tous/	56

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1 Το παραπάνω σχέδιο περιγράφει τον κύλινδρο ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Η περιγραφή δείχνει τα βασικά εξαρτήματα του κυλίνδρου, συμπεριλαμβανομένου του εμβόλου, των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής, του μπουζί και της σύνδεσης.....	44
Σχήμα 2 Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει το έμβολο ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Το σχήμα δείχνει λεπτομέρειες για δακτυλίους εμβόλου, κεφαλή εμβόλου και μπιέλα και πώς συνδέονται με τον στροφαλοφόρο άξονα.....	45



Σχήμα 3 Το παραπάνω σχήμα δείχνει την κυλινδροκεφαλή και τις βαλβίδες ενός μονοκύλινδρου κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Δείχνει τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής συν το μπουζί και πώς είναι διατεταγμένες στην κυλινδροκεφαλή.....	47
Σχήμα 4 Το παραπάνω σχήμα δείχνει το σύστημα ανάφλεξης ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Το σχέδιο περιλαμβάνει το μπουζί, το πηνίο ανάφλεξης, τη μονάδα ελέγχου ανάφλεξης, την μπαταρία και τις συνδέσεις τους μέσα στο σύστημα.....	50
Σχήμα 5 Το παραπάνω σχήμα δείχνει έναν στροφαλοφόρο άξονα και μια μπιέλα του μονοκύλινδρου κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Το σχέδιο δείχνει συνδέσεις του στροφαλοφόρου άξονα και της μπιέλας τόσο με το έμβολο όσο και με τον κύλινδρο σε μια κατασκευή.....	53
Σχήμα 6 Το παραπάνω σχήμα δείχνει ένα μονοκύλινδρο σύστημα καυσίμου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Υποδεικνύει πού είναι τοποθετημένο το δοχείο υδρογόνου, ο ρυθμιστής πίεσης, οι γραμμές, ο εγχυτήρας, οι αισθητήρες και η μονάδα ελέγχου. Το σχέδιο περιγράφει πώς γίνεται η αποθήκευση υδρογόνου και ρυθμίζεται και παρέχεται στον κινητήρα.....	55
Σχήμα 7 Το παραπάνω σχήμα δείχνει το σύστημα ψύξης και λίπανσης για έναν μονοκύλινδρο κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Στο σχέδιο, υπάρχει ψυγείο, αντλία νερού, θερμοστάτης, γραμμές ψυκτικού υγρού, αντλία λαδιού, φίλτρο λαδιού, λεκάνη λαδιού και γραμμές λαδιού. Είναι ένα καλά επεξεργασμένο σχηματικό, όπου κάθε μέρος επισημαίνεται. Αυτό βοηθά στην εμφάνιση του τρόπου με τον οποίο τόσο το ψυκτικό όσο και το λάδι διέρχονται από τον κινητήρα. Ως αποτέλεσμα αυτού του περάσματος, η θερμότητα ρυθμίζεται επαρκώς με την τριβή να διατηρείται σε ελάχιστα επίπεδα.....	59
Σχήμα 8 Το παραπάνω σχήμα δείχνει το σύστημα εξάτμισης και το σιγαστήρα ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Ο σχεδιασμός ενσωματώνει την πολλαπλή εξαγωγής, τον σωλήνα εξάτμισης, τον καταλυτικό μετατροπέα και τον σιγαστήρα. Κάθε στοιχείο ση μειώνεται στα ελληνικά για να δείξει πώς η ροή των καυσαερίων από τον κινητήρα μέσω του συστήματος εξάτμισης βοηθά στη μείωση των εκπομπών και του θορύβου επίσης.....	62

Πίνακες

Πίνακας 2.1 Συγκριτικός Πίνακας Ιδιοτήτων.....	29
Πίνακας 4.1 Ο συγκριτικός πίνακας των καυσίμων.....	65





Εισαγωγή

Η συνεχής αύξηση των εκπομπών CO_2 και η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων καθιστούν επιτακτική την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών που θα συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης από τα παραδοσιακά καύσιμα και στην αύξηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Ένα από τα πιο πολλά υποσχόμενα εναλλακτικά καύσιμα είναι το υδρογόνο, το οποίο μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης μηδενικών εκπομπών.

Αυτή η εργασία επικεντρώνεται στην έρευνα και το σχεδιασμό μονοκύλινδρων κινητήρων εσωτερικής καύσης που τροφοδοτούνται από υδρογόνο. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάλυση των τεχνικών και λειτουργικών παραμέτρων τέτοιων μηχανών, η αξιολόγηση της απόδοσής τους και η εξέταση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.



1 Κεφάλαιο Υδρογόνο και Αυτοκίνητα υδρογόνου

1.1 Γενικά

Το υδρογόνο (H_2) βρίσκεται σχεδόν παντού, αλλά δυστυχώς είναι δύσκολο να βρεθεί ένα ξεχωριστό στοιχείο στη φύση όπου είναι χημικά συνδεδεμένο με το **οξυγόνο** στο **νερό** και τον **άνθρακα** στους **υδρογονάνθρακες**. Πάνω από το 70% του υδρογόνου στην επιφάνεια της **Γης** βρίσκεται στο νερό και σε οργανικές ενώσεις. Αυτό το **άχρωμο, άοσμο και άγευστο χημικό στοιχείο** είναι μια χρήσιμη «πρώτη ύλη» για διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες και είναι επίσης ένα σημαντικό καύσιμο αρκετά για να τροφοδοτήσει όλες τις **κοινωνικές δραστηριότητες**, από **σπίτια, επιχειρήσεις, βιομηχανίες**, ακόμη και τις ανάγκες **ηλεκτρισμού των νοικοκυριών**, ως **καύσιμο μεταφοράς** (Μαρνέλλος, Γ, 2003).



Εικόνα 1.1 Υδρογόνο, Πηγή: <https://e-mc2.gr/el/vivliothiki/eidikes-tehnologies-kai-efarmoges-special-technologies-and-innovative-applications-5>

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη, ως καύσιμο ή φορέας ενέργειας και ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας· έχει πολλές πιθανές εφαρμογές στη **βιομηχανία**, τις **μεταφορές**, την **ενέργεια** και τις **κατασκευές**. Το πιο σημαντικό είναι ότι δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα και οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων κατά τη χρήση είναι σχεδόν μηδενικές. Ως εκ τούτου, αποτελεί σημαντικό μέρος της λύσης για την επίτευξη του στόχου της **Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας** για την κλιματική ουδετερότητα έως το **2050** (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).





Μπορεί να συμβάλει στην απαλλαγή από τον άνθρακα των βιομηχανικών διεργασιών και των οικονομικών τομέων όπου η μείωση των εκπομπών άνθρακα είναι επείγουσα και άπιαστη. Σήμερα, η χρήση υδρογόνου στην ΕΕ παραμένει περιορισμένη, με το υδρογόνο να παράγεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα. Η στρατηγική στοχεύει, αφενός, στην απανθρακοποίηση της παραγωγής υδρογόνου - που επιτυγχάνεται μέσω της ταχείας μείωσης του κόστους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της επιτάχυνσης της ανάπτυξης της τεχνολογίας - και, αφετέρου, στην επέκταση της χρήσης του υδρογόνου σε περιοχές όπου μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά σε εφαρμογές καυσίμων (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

1.2 Πώς παράγεται το υδρογόνο και τι επιπτώσεις έχει στο κλίμα

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω ποικίλων διαδικασιών. Αυτές οι μέθοδοι παραγωγής παράγουν μια ποικιλία εκπομπών, ανάλογα με την τεχνολογία και την ενέργεια που χρησιμοποιείται, και έχουν διαφορετικές επιπτώσεις όσον αφορά το κόστος και τις απαιτήσεις υλικών (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020). Οι μέθοδοι αυτοί είναι:

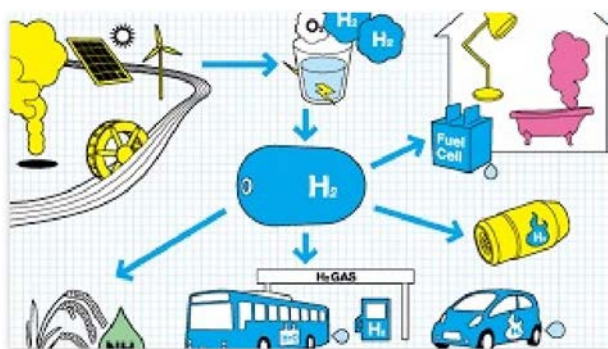
☛ Το «*ηλεκτρικό υδρογόνο*» είναι το υδρογόνο που παράγεται με ηλεκτρόλυση νερού (σε ηλεκτρολυτική κυψέλη, που τροφοδοτείται από ηλεκτρισμό), ανεξάρτητα από την πηγή του ηλεκτρισμού. Για την παραγωγή υδρογόνου με βάση την ηλεκτρική ενέργεια, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στον κύκλο ζωής εξαρτώνται από τον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

☛ Το «*ανανεώσιμο υδρογόνο*» είναι το υδρογόνο που παράγεται με ηλεκτρόλυση νερού (σε ηλεκτρολυτικές κυψέλες, που τροφοδοτούνται από ηλεκτρική ενέργεια) και με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές έχει σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της. Εάν πληρούνται οι απαιτήσεις βιωσιμότητας, το ανανεώσιμο υδρογόνο μπορεί επίσης να παραχθεί με αναμόρφωση βιοαερίου (αντί για φυσικό αέριο) ή βιοχημική μετατροπή της βιομάζας (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).



☛ Το καθαρό υδρογόνο αναφέρεται στο υδρογόνο που είναι ανανεώσιμο (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

☛ Το «υδρογόνο ορυκτών καυσίμων» είναι το υδρογόνο που παράγεται μέσω διαφόρων διεργασιών που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ως πρώτες ύλες, ιδίως αναμόρφωση φυσικού αερίου ή αεριοποίηση άνθρακα. Αυτό αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό υδρογόνου που παράγεται σήμερα. Η παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα έχει υψηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στον κύκλο ζωής (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).



Εικόνα 1.2 Υδρογόνο - ο ισχυρότερος δεσμός, Πηγή: <https://www.e-mc2.gr/en/node/796>

☛ Το «υδρογόνο ορυκτών καυσίμων που δεσμεύει το διοξείδιο του άνθρακα» είναι μια υποκατηγορία του υδρογόνου ορυκτών καυσίμων στην οποία δεσμεύονται τα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται κατά την παραγωγή υδρογόνου. Η παραγωγή υδρογόνου ορυκτών καυσίμων μέσω δέσμευσης CO₂ ή πυρόλυσης έχει χαμηλότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από το υδρογόνο των ορυκτών καυσίμων, αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεταβλητή απόδοση της δέσμευσης αερίων θερμοκηπίου (έως 90%) (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

☛ Το «υδρογόνο χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα» περιλαμβάνει το υδρογόνο ορυκτών καυσίμων που δεσμεύει το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο με βάση την ηλεκτρική ενέργεια που εκπέμπει σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου πλήρους διάρκειας ζωής σε σύγκριση με την υπάρχουσα παραγωγή υδρογόνου (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).







Τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται από υδρογόνο περιλαμβάνουν μια ποικιλία από αέρια και υγρά καύσιμα με βάση το υδρογόνο και τον άνθρακα. Για να θεωρηθεί ένα συνθετικό καύσιμο ανανεώσιμο, το τμήμα υδρογόνου του αερίου σύνθεσης πρέπει να είναι ανανεώσιμο. Τα συνθετικά καύσιμα περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, τη συνθετική κηροζίνη στην αεροπορία, το συνθετικό ντίζελ στα αυτοκίνητα και διάφορα μόρια που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή χημικών ουσιών και λιπασμάτων. Ανάλογα με τις πρώτες ύλες και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται, τα συνθετικά καύσιμα μπορούν να παράγουν διαφορετικά επίπεδα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Όσον αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση, η καύση συνθετικών καυσίμων παράγει παρόμοια επίπεδα εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων με τα ορυκτά καύσιμα (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

1.2.1 Πώς υποστηρίζει το υδρογόνο την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

Εκτός από την ηλεκτροδότηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αποτελεσματικότερη και κυκλική χρήση των πόρων, όπως ορίζεται στη **Στρατηγική Ενεργειακής Ενοποίησης**, η ταχεία ανάπτυξη καθαρού υδρογόνου μεγάλης κλίμακας είναι το κλειδί για την επίτευξη των φιλόδοξων κλιματικών στόχων της **ΕΕ**. Αυτό είναι το κομμάτι του παζλ που λείπει σε μια πλήρως απανθρακωμένη οικονομία (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

Το υδρογόνο μπορεί να υποστηρίξει τη μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα που βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εξισορροπώντας τη μεταβλητή ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές. Παρέχει λύσεις για την απανθρακοποίηση βιομηχανικών τομέων υψηλών εκπομπών που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα που δεν μπορούν να ηλεκτροδοτηθούν. Τέλος, δεν εκπέμπει **διοξείδιο του άνθρακα** και μετά βίας μολύνει την ατμόσφαιρα (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

1.2.2 Πώς μπορεί το υδρογόνο να υποστηρίξει την ανάκαμψη, την ανάπτυξη και τις θέσεις εργασίας

Οι επενδύσεις στο υδρογόνο θα αποτελέσουν μοχλό ανάπτυξης, κάτι που θα είναι κρίσιμο στο πλαίσιο της ανάκαμψης από την κρίση του **COVID-19**. Το σχέδιο ανάκαμψης της Επιτροπής υπογραμμίζει την ανάγκη να ξεκλειδωθούν οι επενδύσεις



σε βασικές καθαρές τεχνολογίες και αλυσίδες αξίας για την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης και των βιώσιμων θέσεων εργασίας. Το καθαρό υδρογόνο επισημαίνεται ως ένας από τους βασικούς τομείς που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και προτείνονται ορισμένες πιθανές κατευθύνσεις για υποστήριξη.

Επιπλέον, η Ευρώπη είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική στην κατασκευή τεχνολογιών παραγωγής καθαρού υδρογόνου και βρίσκεται σε καλή θέση για να επωφεληθεί από την παγκόσμια ανάπτυξη του καθαρού υδρογόνου ως φορέα ενέργειας. Οι σωρευτικές ευρωπαϊκές επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές υδρογόνου θα μπορούσαν να φτάσουν τα 180-470 δισεκατομμύρια ευρώ έως το 2050 και τα 3-18 δισεκατομμύρια ευρώ σε υδρογόνο ορυκτών καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Σε συνδυασμό με την ηγετική θέση της **ΕΕ** στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η εμφάνιση μιας αλυσίδας αξίας υδρογόνου που εξυπηρετεί πολλούς βιομηχανικούς τομείς και άλλες τελικές χρήσεις θα μπορούσε να απασχολήσει άμεσα ή έμμεσα έως και 1 εκατομμύριο άτομα. Οι αναλυτές εκτιμούν ότι μέχρι το 2050, το καθαρό υδρογόνο θα μπορούσε να καλύψει το 24% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, με τις ετήσιες πωλήσεις να αγγίζουν τα 630 δισεκατομμύρια ευρώ.

1.3 Υβριδικό ή ηλεκτρικό, Ούτε – τα αυτοκίνητα υδρογόνου είναι το μέλλον και μια νέα κατηγορία

Ορισμένες αυτοκινητοβιομηχανίες επενδύουν ήδη σε αυτήν την τεχνολογία. Τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου διαφέρουν θεμελιωδώς από τα **βενζινοκίνητα, ντίζελ, υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα**. Στην πραγματικότητα, οι περισσότεροι τα θεωρούν μια κατηγορία από μόνα τους. Σήμερα είναι μόνο μια χούφτα, με λίγες μονάδες σε κάθε χώρα, αλλά το μέλλον τους αναμένεται να είναι λαμπρό (Νικολουπούλου. Ε, 2021).





Εικόνα 1.3 Περιβάλλον: Υδρογόνο, Οφέλη και Κίνδυνοι, Πηγή: <http://artinews.gr>

1.3.1 Ποια είναι η διαφορά μεταξύ του κινητήρα εσωτερικής καύσης H_2 και της κυψέλης καυσίμου H_2

✓ Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης H_2 είναι μια ελαφρώς διαφορετική έκδοση του κλασικού βενζινοκινητήρα. Η δεξαμενή νερού τροφοδοτείται με απεσταγμένο νερό, το οποίο ηλεκτρολύεται για να παράγει υδρογόνο (που μεταφέρεται στον θάλαμο καύσης μέσω αεραγωγών) και οξυγόνο (O_2) σε ξεχωριστές εξόδους και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Αλλά η κύρια διαφορά είναι στην εξάτμιση: οι βενζινοκινητήρες εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οξείδια του αζώτου και υδρατμούς, ενώ οι κινητήρες υδρογόνου εκπέμπουν μόνο υδρατμούς (Κάππας, Κ, 2018).

✓ Η «κυψέλη καυσίμου» είναι ένας ηλεκτροχημικός μηχανισμός παραγωγής ενέργειας: μετατρέπει (αποθηκευμένο) υδρογόνο και (ατμοσφαιρικό) οξυγόνο σε νερό, παράγοντας τόσο ηλεκτρισμό όσο και θερμότητα. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου διαφέρουν από τις μπαταρίες στο ότι απαιτούν συνεχή ανάμειξη των αερίων καυσίμου H_2 και O_2 προκειμένου να συμβεί και να διατηρηθεί η χημική αντίδραση. Πρόκειται για μια σχετικά ακριβή τεχνολογία καθώς απαιτεί τη χρήση σπάνιων μετάλλων όπως η **πλατίνα**. Σε μια μπαταρία, αντίθετα, η χημική ενέργεια είναι ήδη αποθηκευμένη σε αυτήν (Κάππας, Κ, 2018).

1.3.2 Αυτοκίνητα εξοπλισμένα με μπαταρίες υδρογόνου

Ένα λίτρο βενζίνης περιέχει περίπου 2.600 φορές την ενέργεια ενός λίτρου υδρογόνου. Επομένως, τα αυτοκίνητα πρέπει να αποθηκεύουν υδρογόνο σε εξαιρετικά υψηλές πιέσεις έως και 680 ατμόσφαιρες. Ωστόσο, ακόμη και κάτω από



τέτοια πίεση, τα αυτοκίνητα απαιτούν τεράστιες δεξαμενές καυσίμου (έως και τέσσερις φορές το μέγεθος της δεξαμενής) (Κάππας. Κ, 2018).

Το υγρό υδρογόνο, από την άλλη, λειτουργεί καλύτερα και απαιτεί διπλάσια χωρητικότητα ρεζερβουάρ από ένα συμβατικό αυτοκίνητο. Ωστόσο, για να παραμείνει υγρό το υδρογόνο, η θερμοκρασία του πρέπει να είναι εξαιρετικά χαμηλή (-253°C). Ο κατασκευαστής πρότεινε μια λύση «υπερμόνωσης»: δεξαμενή υδρογόνου διπλής στρώσης με πολλαπλά στρώματα αλουμινίου και υαλοβάμβακα, που φτάνει σε πάχος τα 30 mm (Κάππας. Κ, 2018).

Η **BMW** λέει ότι αυτή η μόνωση είναι τόσο αποτελεσματική που «αν γεμίσει κάποιος τη δεξαμενή με ζεστό καφέ, θα έπρεπε να περιμένει περίπου 80 ημέρες για να κρυώσει σε θερμοκρασία πόσιμου» (Κάππας. Κ, 2018).



Εικόνα 1.4 Η πιθανότητα υδρογόνου, Πηγή: <https://www.toyota.gr/electrified/fuel-cell-electric>

Το υδρογόνο αντιπροσωπεύει το 70% της γνωστής ύλης στο σύμπαν. Δεν είναι περίεργο που η οδήγηση είναι στην πραγματικότητα πιο ασφαλής από τη **βενζίνη** ή το **ντίζελ**. Ως ειδικός στην καινοτομία οχημάτων μηδενικών εκπομπών ρύπων, η αυτοκινητοβιομηχανία **Toyota** έχει περάσει χρόνια δοκιμάζοντας τα υδρογονοκίνητα οχήματά της σε ακραίες συνθήκες για να διασφαλίσει ότι είναι εξίσου ασφαλή και αξιόπιστα στη χρήση με όλα τα άλλα μοντέλα. Οι πολυεπίπεδες δεξαμενές υδρογόνου



της αυτοκινητοβιομηχανίας **Toyota** προστατεύονται εξαιρετικά καλά - είναι τόσο ανθεκτικές που ακόμη και οι σφαίρες σε κοντινή απόσταση δεν μπορούν να τις διαπεράσουν. Το αποτέλεσμα είναι πραγματική ηρεμία για όλους τους οδηγούς (Toyota, 2024).



2 Κεφάλαιο Έρευνα για μονοκύλινδρο κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης

Οι αυξανόμενες ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή και η ανάγκη για βιώσιμες ενεργειακές λύσεις έχουν αυξήσει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων. Το υδρογόνο αναδεικνύεται ως ένα πολλά υποσχόμενο καύσιμο επειδή εκπέμπει μηδενικό διοξείδιο του άνθρακα κατά την καύση. Η χρήση υδρογόνου στα MEK είναι μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες που διερευνώνται για τη βιώσιμη κινητικότητα (Thomas. S Barro. C & Pihl. J, 2020).

2.1 Σύγχρονη έρευνα για τη χρήση του υδρογόνου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης

Το υδρογόνο θεωρείται ένα από τα πολλά υποσχόμενα καύσιμα λόγω της καθαρής καύσης του, η οποία παράγει κυρίως νερό ως υποπροϊόν (Barbir. F, 2005). Πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην απόδοση και την απόδοση των κινητήρων εσωτερικής καύσης όταν χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο. Για παράδειγμα, οι (Saravanan. N Nagarajan. G Narayanasamy. S & Sampath. S, 2008) μελέτησαν τη χρήση του υδρογόνου σε MEK και διαπίστωσαν ότι η απόδοση θα μπορούσε να βελτιωθεί σημαντικά με τη σωστή ρύθμιση του μείγματος αέρα-υδρογόνου και χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ανάφλεξης υψηλής ενέργειας. Η έρευνά τους δείχνει ότι η θερμοδυναμική απόδοση μπορεί να φτάσει σε επίπεδα ανταγωνιστικά με τα συμβατικά καύσιμα.





Εικόνα 2.5 Μετάβαση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου;, Πηγή:
<https://www.liberal.gr/aytokinito/strofi-stoys-kinitires-esoterikis-kaysis-ydrogonoy>

2.1.1 Εκπομπές Ρύπων

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του υδρογόνου είναι οι χαμηλές εκπομπές του. Έρευνα των (Verhelst. S & Sierens. R, 2001) έδειξε ότι οι κινητήρες με υδρογόνο παράγουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και μονοξειδίου του άνθρακα και μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές οξειδίου του αζώτου όταν χρησιμοποιούνται στρατηγικές έγχυσης και καύσης σε χαμηλή θερμοκρασία.

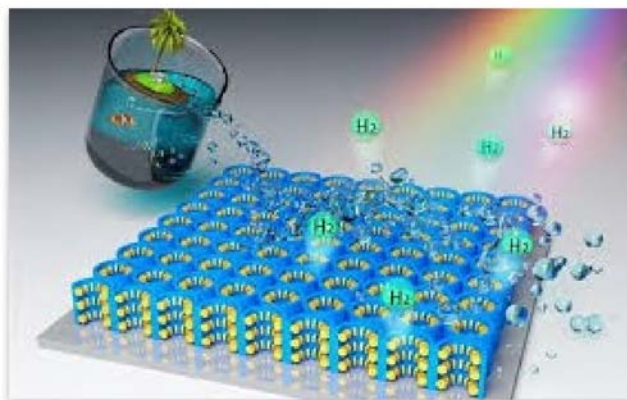
2.1.2 Προκλήσεις και προοπτικές

Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν ορισμένες τεχνικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση υδρογόνου στις **ΜΕΚ**. Οι ιδιότητες του υδρογόνου απαιτούν ειδικά συστήματα αποθήκευσης και διανομής, καθώς και τροποποιήσεις του κινητήρα για την πρόληψη της πρόωρης ανάφλεξης και της ανάκαμψης της καύσης (Swain. M.R, 1993). Η έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση των τεχνολογιών υλικών και αποθήκευσης, καθώς και στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα.

2.2 Παραγωγή υδρογόνου: μέθοδοι και αξιολόγηση

Η παραγωγή υδρογόνου αποτελεί βασική τεχνολογία για την επίτευξη ενός βιώσιμου ενεργειακού μέλλοντος. Το υδρογόνο είναι ένας καθαρός φορέας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών. Αυτή η ενότητα εξετάζει διάφορες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου, αξιολογώντας την **αποτελεσματικότητά** τους, το **κόστος** και τις **περιβαλλοντικές επιπτώσεις** τους (Smith. J, 2020).





Εικόνα 2.6 Παραγωγή και ενέργεια υδρογόνου, Πηγή: <https://hydrogenonline.gr/nea-gia-to-ydrogono/176-paragogi-kai-energeia-ydrogonou>

Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν και έχει μοναδικές **χημικές ιδιότητες** που το καθιστούν ιδανικό φορέα ενέργειας. Η παραγωγή υδρογόνου χρονολογείται από τον 18^ο αιώνα, με σημαντικές προόδους τον 20^ο και τον 21^ο αιώνα (Johnson. A, 2019).

Οι Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι οι εξής:

- ✓ Ηλεκτρόλυση,
- ✓ Αναμόρφωση φυσικού αερίου,
- ✓ Θερμοχημικές μέθοδοι,
- ✓ Βιολογικές μέθοδοι.

2.2.1 Παραγωγή Υδρογόνου με Ηλεκτρόλυση

Η ηλεκτρόλυση είναι μια από τις πιο κοινές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου, χρησιμοποιώντας ηλεκτρισμό για τη διάσπαση του νερού (H_2O) σε υδρογόνο (H_2) και οξυγόνο (O_2). Αυτή η μέθοδος θεωρείται ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον, ειδικά εάν η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές.

2.2.2 Βασική αρχή της Ηλεκτρόλυσης

Η ηλεκτρόλυση βασίζεται στη διάσπαση των μορίων του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από έναν ηλεκτρολύτη. Οι ηλεκτρολύτες είναι υδατικά διαλύματα που περιέχουν ιόντα και μπορούν να φορτιστούν.

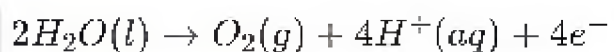


2.2.3 Διαδικασία ηλεκτρόλυσης

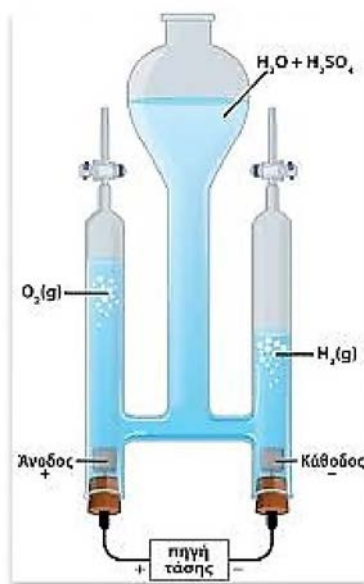
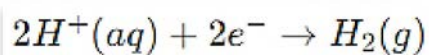
1. Διάταξη Ηλεκτρόλυσης

Η βασική διάταξη για την ηλεκτρόλυση αποτελείται από μια δεξαμενή που περιέχει ηλεκτρολύτη και δύο ηλεκτρόδια: μια άνοδο και μια κάθοδο. Όταν εφαρμόζεται τάση στα ηλεκτρόδια, το νερό διασπάται στα επιμέρους συστατικά του. Οι αντιδράσεις κατά την ηλεκτρόλυση νερού μπορούν να περιγραφούν με τις ακόλουθες χημικές εξισώσεις:

- Στην άνοδο (οξείδωση):



- Στην κάθοδο (αναγωγή):



Εικόνα 2.7 Συσκευή Hoffman, Πηγή:

https://users.sch.gr/xbalasi/electrochem/sect04/page_peirama.html

2.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της Ηλεκτρόλυσης

Πλεονεκτήματα



Φιλική προς το περιβάλλον: Η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση είναι φιλική προς το περιβάλλον, ειδικά όταν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια (Swain. M.R, 1993).

Καθαρότητα υδρογόνου: Το υδρογόνο που παράγεται είναι πολύ καθαρό, καθιστώντας το κατάλληλο για χρήση σε κυψέλες καυσίμου και άλλες εφαρμογές.

Μειονεκτήματα

Κόστος: Η ηλεκτρόλυση απαιτεί μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας την έναν ακριβό τρόπο παραγωγής υδρογόνου σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπως η αναμόρφωση φυσικού αερίου.

Απόδοση: Η ενεργειακή απόδοση της ηλεκτρόλυσης είναι σχετικά χαμηλή, γεγονός που περιορίζει την ευρεία εφαρμογή της χωρίς την υποστήριξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Verhelst. S & Sierens. R, 2001).

2.3 Παραγωγή Υδρογόνου με Αναμόρφωση Φυσικού Αερίου

Η αναμόρφωση φυσικού αερίου είναι η πιο κοινή μέθοδος παραγωγής υδρογόνου και βασίζεται στη χημική μετατροπή του φυσικού αερίου (κυρίως **μεθανίου**) σε υδρογόνο μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της υψηλής απόδοσης και του σχετικά χαμηλού κόστους σε σύγκριση με άλλες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου.

2.3.1 Διαδικασία Αναμόρφωσης Φυσικού Αερίου

1. Βασική Αρχή της Αναμόρφωσης

Η διαδικασία αναμόρφωσης του φυσικού αερίου αποτελείται από δύο κύρια στάδια:

☛ **Αναμόρφωση μεθανίου ατμού (SMR):** Το φυσικό αέριο αντιδρά με τον ατμό σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσία καταλύτη και παράγει υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).

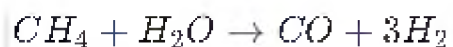
☛ **Μετατόπιση αερίου νερού (WGS):** Το μονοξείδιο του άνθρακα που παράγεται στο πρώτο στάδιο αντιδρά με τον ατμό για να παράγει επιπλέον υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα.

2. Χημικές Αντιδράσεις

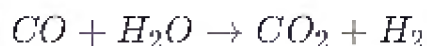


Οι βασικές χημικές αντιδράσεις της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου είναι οι εξής.

- Αναμόρφωση με Ατμό:



- Μετατόπιση Υδατοαερίου:



3. Διάταξη της Διαδικασίας

Η διαδικασία ξεκινά με την προεπεξεργασία του φυσικού αερίου για την απομάκρυνση των θειούχων ενώσεων που μπορούν να δηλητηριάσουν τον καταλύτη. Στη συνέχεια, το αέριο εισέρχεται στον αντιδραστήρα αναμόρφωσης όπου λαμβάνει χώρα η αναμόρφωση με ατμό. Το προϊόν αυτής της αντίδρασης στη συνέχεια διοχετεύεται σε έναν αντιδραστήρα μετατόπισης αερίου νερού για να αυξηθεί η παραγωγή υδρογόνου.

2.3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Αναμόρφωσης Φυσικού Αερίου

Πλεονεκτήματα

- ✓ **Υψηλή απόδοση**: Αυτή η μέθοδος έχει υψηλή απόδοση παραγωγής υδρογόνου, υψηλή απόδοση και οικονομία.
- ✓ **Τεχνολογική ωριμότητα**: Η τεχνολογία αναμόρφωσης φυσικού αερίου είναι ώριμη και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία.
- ✓ **Σχετικά χαμηλό κόστος**: Η παραγωγή υδρογόνου μέσω αυτής της μεθόδου είναι πιο οικονομική από άλλες μεθόδους όπως η ηλεκτρόλυση (Verhelst. S & Sierens. R, 2001).

Μειονεκτήματα



✓ **Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα:** Η διαδικασία αναμόρφωσης του φυσικού αερίου παράγει διοξείδιο του άνθρακα, με αποτέλεσμα τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

✓ **Εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα:** Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στη χρήση φυσικού αερίου, ενός ορυκτού καυσίμου, το οποίο είναι ένας μη ανανεώσιμος πόρος (Swain. M.R, 1993).

2.4 Παραγωγή Υδρογόνου με Θερμοχημικές Μεθόδους

Η θερμοχημική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί θερμική ενέργεια για να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις, να αποσυνθέσει ενώσεις και να παράγει υδρογόνο. Αυτές οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερα σημαντικές γιατί μπορούν να αξιοποιήσουν τη θερμική ενέργεια από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των πυρηνικών αντιδραστήρων και της ηλιακής ενέργειας.

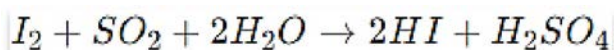
2.4.1 Διαδικασία Θερμοχημικής Διάσπασης του Νερού

Η θερμοχημική διάσπαση του νερού περιλαμβάνει τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο μέσω μιας σειράς ενδιάμεσων χημικών αντιδράσεων. Η πιο μελετημένη θερμοχημική διεργασία είναι ο κύκλος **θείου-ιωδίου** (κύκλος S-I), αλλά υπάρχουν και άλλες, όπως ο κύκλος **χαλκού-χλωρίου** (κύκλος Cu-Cl).

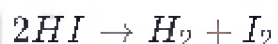
1. Κύκλος Θείου-Ιωδίου (S-I Cycle)

Ο κύκλος **θείου-ιωδίου** είναι μια διαδικασία πολλαπλών σταδίων που χρησιμοποιεί θείο και ιώδιο για την παραγωγή αερίου υδρογόνου από το νερό. Οι κύριες αντιδράσεις του κύκλου είναι οι εξής:

1. Διασπάσεις σε υψηλή θερμοκρασία:



2. Διαχωρισμός Υδροϊωδίου (HI):



3. Διάσπαση Θεικού Οξέος:



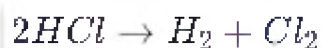
2. Κύκλος Χαλκού-Χλωρίου (Cu-Cl Cycle)

Ο κύκλος **χαλκού-χλωρίου** είναι μια άλλη θερμοχημική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου χρησιμοποιώντας μια ένωση χαλκού και χλωρίου. Οι κύριες αντιδράσεις του κύκλου είναι:

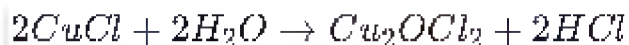
1. Θερμική διάσπαση του χλωριούχου χαλκού:



2. Διαχωρισμός του υδροχλωρικού οξέος (HCl):



3. Υδρόλυση του χλωριούχου χαλκού:



2.4.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Θερμοχημικών Μεθόδων

Πλεονεκτήματα

✓ **Χρήση ανανεώσιμων πηγών θερμότητας:** Οι θερμοχημικές διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν θερμική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή ενέργεια και οι πυρηνικοί αντιδραστήρες (Swain. M.R, 1993).

✓ **Αποδοτική παραγωγή:** Αυτές οι μέθοδοι έχουν τη δυνατότητα να είναι πολύ αποτελεσματικές σε παραγωγή μεγάλης κλίμακας, ειδικά όταν χρησιμοποιείται συνεχής θέρμανση.

Μειονεκτήματα



✓ **Υψηλή θερμοκρασία:** Απαιτούνται πολύ υψηλές θερμοκρασίες για την επίτευξη χημικών αντιδράσεων, καθιστώντας τη διαχείριση και τη συντήρηση του εξοπλισμού πιο δύσκολη και δαπανηρή (Verhelst. S & Sierens. R, 2001).

✓ **Πολυπλοκότητα διαδικασίας:** Οι Θερμοχημικές μέθοδοι περιλαμβάνουν πολλές ενδιάμεσες αντιδράσεις και στάδια, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις για έλεγχο και συντήρηση.

2.5 Παραγωγή Υδρογόνου με Βιολογικές Μεθόδους

Οι μέθοδοι παραγωγής με Βιολογικές Μεθόδους χρησιμοποιούν τις φυσικές διεργασίες των μικροοργανισμών για τη μετατροπή των οργανικών υλικών σε αέριο υδρογόνο. Αυτές οι μέθοδοι θεωρούνται βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον επειδή μπορούν να χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πρώτες ύλες και να λειτουργούν υπό ήπιες συνθήκες.

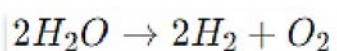
2.5.1 Διαδικασίες Βιολογικής Παραγωγής Υδρογόνου

Διάφορες βιολογικές διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένης της **βιοφωτόλυσης**, της **σκοτεινής ζύμωσης** και της **φωτοζύμωσης**.

1. Βιοφωτόλυση

Η βιοφωτόλυση είναι η διαδικασία με την οποία φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί όπως τα φύκια και τα κυανοβακτήρια χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να διασπάσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι άμεση ή έμμεση.

- Άμεση Βιοφωτόλυση:



Οι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί απορροφούν το φως και χρησιμοποιούν αυτή την ενέργεια για να χωρίσουν το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο.



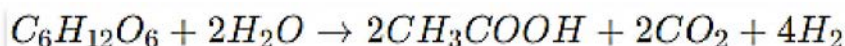
- Έμμεση Βιοφωτολύση:

Η έμμεση βιοφωτολύση περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια στα οποία οι οργανικές ενώσεις αρχικά αποσυντίθενται και στη συνέχεια τα προκύπτοντα ενδιάμεσα μετατρέπονται σε αέριο υδρογόνο.

2. Σκοτεινή Ζύμωση

Η σκοτεινή ζύμωση είναι μια αναερόβια διαδικασία κατά την οποία οι μικροοργανισμοί διασπούν οργανικά υλικά, όπως βιομάζα ή οργανικά απόβλητα, παράγοντας αέριο υδρογόνο και οργανικά οξέα.

- Βασική Αντίδραση Σκοτεινής Ζύμωσης:

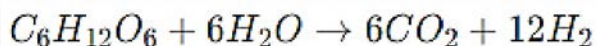


Οι μικροοργανισμοί ζυμώνουν σάκχαρα όπως η γλυκόζη, παράγοντας υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα και οργανικά οξέα.

3. Φωτοζύμωση

Η φωτοζύμωση είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα φωτοσυνθετικά βακτήρια χρησιμοποιούν το φως για να μετατρέψουν οργανικές ενώσεις σε υδρογόνο.

- Βασική Αντίδραση Φωτοζύμωσης:



Οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν φωτεινή ενέργεια για να ζυμώσουν οργανικά υποστρώματα και να παράγουν αέριο υδρογόνο.

2.5.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Βιολογικών Μεθόδων

Πλεονεκτήματα

✓ Φίλικές προς το περιβάλλον: Οι βιολογικές μέθοδοι χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πρώτες ύλες και παράγουν ελάχιστα απόβλητα, καθιστώντας τις ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον (Swain. M.R, 1993).

✓ Ήπιες συνθήκες: Λειτουργούν σε ήπιες θερμοκρασίες και πιέσεις, μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις και το κόστος εξοπλισμού.



Μειονεκτήματα

- ✓ **Χαμηλή απόδοση**: Οι βιολογικές διεργασίες είναι γενικά λιγότερο αποτελεσματικές στην παραγωγή υδρογόνου σε σύγκριση με άλλες μεθόδους όπως η αναμόρφωση φυσικού αερίου (Verhelst. S & Sierens. R, 2001).
- ✓ **Πολυπλοκότητα και ευαισθησία**: Οι βιολογικές διεργασίες είναι ευαίσθητες στις περιβαλλοντικές αλλαγές και απαιτούν ακριβή έλεγχο των συνθηκών μικροβιακής καλλιέργειας.

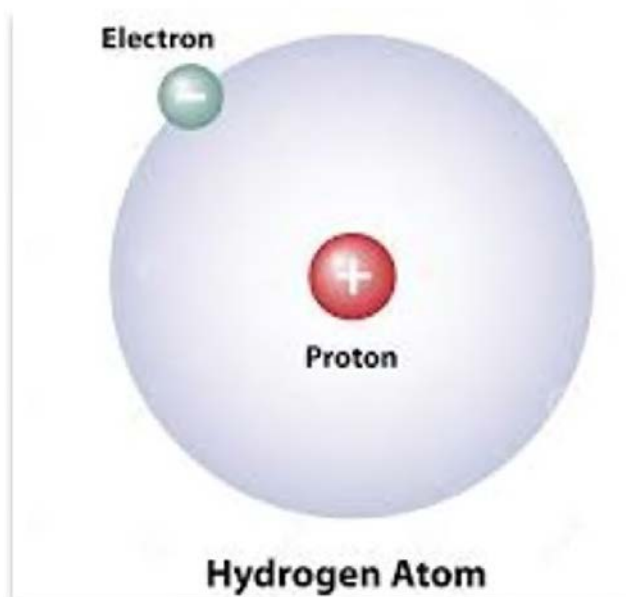
2.6 Χημεία και Φυσική του Υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι το πρώτο στοιχείο στον περιοδικό πίνακα και το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν. Είναι το πιο ελαφρύ και βασικό στοιχείο και παίζει ζωτικό ρόλο στη χημεία και τη φυσική. Το υδρογόνο υπάρχει σε πολλές μορφές και συμμετέχει σε πολλές σημαντικές χημικές αντιδράσεις και η έρευνά του έχει συμβάλει σημαντικά στην ανάπτυξη της κβαντικής μηχανικής και της αστροφυσικής. Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστούν οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του υδρογόνου.

2.6.1 Φυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου

Το υδρογόνο (**H**) είναι το ελαφρύτερο στοιχείο με ατομικό αριθμό **1** και ατομικό βάρος περίπου **1,00784 u**. Ένα άτομο υδρογόνου αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Η μοριακή μορφή του υδρογόνου, **H₂**, αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου που συνδέονται με έναν μόνο ομοιοπολικό δεσμό (Brown. T, 2018).





Εικόνα 2.8 Μοριακή δομή ατόμου υδρογόνου, Πηγή: <https://gr.dreamstime.com/>

2.6.2 Ιδιότητες Αερίου, Υγρού και Στερεού Υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι αέριο σε θερμοκρασία και πίεση δωματίου. Το υδρογόνο είναι **άχρωμο**, **άοσμο** και **άγευστο**. Μπορεί να υγροποιηθεί σε θερμοκρασίες - **252,87°C** και να στερεοποιηθεί σε ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες (Johnson. A, 2019). Το υγρό υδρογόνο χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, όπως το καύσιμο πυραύλων (Evans. L, 2011).

1. Αέριο Υδρογόνο

Το αέριο υδρογόνο (H_2) είναι η πιο κοινή μορφή υδρογόνου που βρίσκεται στη φύση. Είναι το ελαφρύτερο αέριο και αποτελείται από διαμοριακά μόρια (H_2) με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς.

- **Φυσικές ιδιότητες:** Το υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο. Η πυκνότητά του είναι πολύ χαμηλή, περίπου **0,08988 g/L** στους **0°C** και **1 atm** (Weast. R. C, 1986).
- **Χημικές ιδιότητες:** Πολύ εύφλεκτο, αντιδρά έντονα με το οξυγόνο για να σχηματίσει νερό, η αντίδραση είναι η εξής:





- **Χρήσεις:** Χρησιμοποιείται ευρέως ως καύσιμο, στη χημική σύνθεση και στην παραγωγή αμμωνίας μέσω της διαδικασίας **Haber** (Atkins. P & Jones. L, 2010).

2. Υγρό Υδρογόνο

Το **υγρό** υδρογόνο λαμβάνεται με ψύξη του αερίου υδρογόνου κάτω από το σημείο βρασμού του στους **-252,87°C (20,28 K)** σε κανονική πίεση.

- **Φυσικές ιδιότητες:** Το υγρό υδρογόνο είναι διαφανές και άχρωμο. Έχει εξαιρετικά χαμηλή **πυκνότητα** περίπου **70,85 g/L** (NIST, 2019).

- **Χημικές ιδιότητες:** Οι χημικές ιδιότητες του υδρογόνου διατηρούνται, αλλά ο ρυθμός αντίδρασης είναι πιο αργός λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας.

- **Χρήσεις:** Χρησιμοποιείται κυρίως ως καύσιμο σε εφαρμογές πυραύλων και ως ψυκτικό σε υπεραγώγιμα συστήματα (Anderson. J. D, 2012).

3. Στερεό Υδρογόνο

Στερεό υδρογόνο σχηματίζεται με περαιτέρω ψύξη υγρού υδρογόνου κάτω από το σημείο τήξης του στους **-259,16°C (14,01 K)**.

- **Φυσικές ιδιότητες:** Το στερεό υδρογόνο είναι ένα διαφανές, άχρωμο στερεό. Έχει πολύ χαμηλή πυκνότητα περίπου **0,086 g/cm³** (Nellis. W. J & Weir. S. T, 2012).

- **Χημικές ιδιότητες:** Οι χημικές αντιδράσεις είναι εξαιρετικά αργές σε αυτές τις θερμοκρασίες λόγω μειωμένης μοριακής κινητικότητας.

- **Χρήσεις:** Οι ερευνητικές χρήσεις περιλαμβάνουν τη μελέτη των ιδιοτήτων των ουσιών σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις (Silvera. I. F, 2010).



Πίνακας 2.1 Συγκριτικός Πίνακας Ιδιοτήτων

Ιδιότητα	Αέριο Υδρογόνο	Υγρό Υδρογόνο	Στερεό Υδρογόνο
Θερμοκρασία (°C)	> -252.87	-252.87 έως -259.16	< -259.16
Πυκνότητα	0.08988 g/L	70.85 g/L	0.086 g/cm ³
Χρώμα	Άχρωμο	Διαυγές, Άχρωμο	Διαφανές, Άχρωμο
Χρήσεις	Καύσιμα, Χημικές Συνθέσεις	Πυραυλική Κίνηση, Ψυκτικό	Ερευνητικές Χρήσεις

2.6.3 Χημικές Ιδιότητες του Υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι εξαιρετικά αντιδραστικό και μπορεί να σχηματίσει ενώσεις με όλα σχεδόν τα άλλα στοιχεία. Είναι ισχυρός αναγωγικός παράγοντας και συμμετέχει σε πολλές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις (Clark. P, 2015). Η χημεία του υδρογόνου είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση οργανικών και ανόργανων ενώσεων.

1. Αντιδράσεις με άλλα συστατικά

Το υδρογόνο αντιδρά με το οξυγόνο για να σχηματίσει νερό (H_2O), μια εξώθερμη αντίδραση που απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Αντιδρά επίσης με το άζωτο για να σχηματίσει αμμωνία (NH_3) μέσω της διαδικασίας **Haber-Bosch** και με αλογόνα για να σχηματίσει υδρογόνο, όπως το υδροχλωρικό οξύ (HCl) (Walker. E, 2014).

2. Ρόλος στις Χημικές Ενώσεις

Το υδρογόνο είναι σημαντικό σε πολλές ενώσεις. Μεταξύ των υδρογονανθράκων, αποτελεί τη βάση της οργανικής χημείας. Συμμετέχει επίσης στη σύνθεση οξέων, βάσεων και αλάτων. Η παρουσία υδρογόνου είναι κρίσιμη για πολλές βιοχημικές διεργασίες και την ισχύ των κυψελών καυσίμου (Davis. K, 2013).



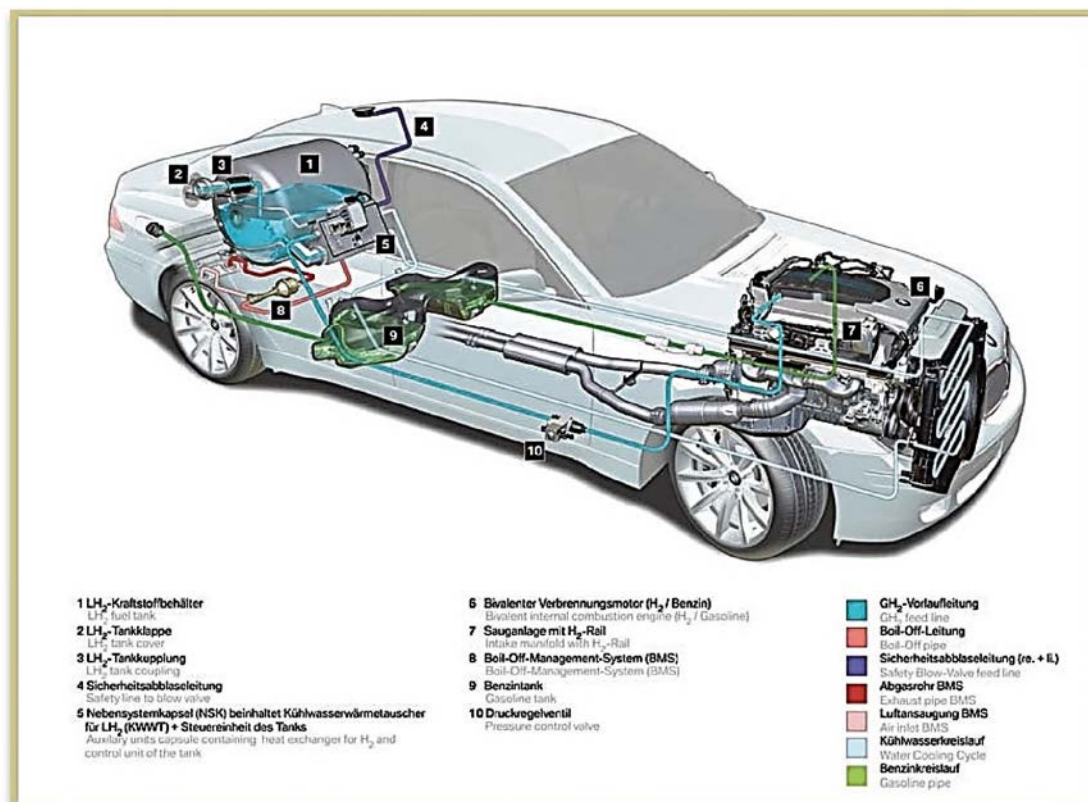
3 Κεφάλαιο Μονοκύλινδρη Μηχανή Εσωτερική Καύσης Υδρογόνου

Οι μονοκύλινδροι κινητήρες υδρογόνου εσωτερικής καύσης (**H₂-ICE**) αντιπροσωπεύουν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τη μείωση των εκπομπών και την προώθηση της χρήσης καθαρών καυσίμων. Αυτά τα μηχανήματα χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο και έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά και προκλήσεις. Εδώ, περιγράφονται οι τεχνολογίες καύσης, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και τα πλεονεκτήματα του **H₂-ICE**.

3.1 Βασικές αρχές λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης είναι η ίδια με αυτή ενός συμβατικού κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ο κύριος κύκλος εργασίας περιλαμβάνει τα στάδια **εισαγωγής, συμπίεσης, καύσης** και **εξαγωγής**. Η καύση του υδρογόνου γίνεται με τη βοήθεια ενός σπινθήρα, όπως και σε έναν βενζινοκινητήρα.





Εικόνα 3.9 Μηχανές υδρογόνου και εσωτερικής καύσης¹, Πηγή:
<https://www.pemptousia.gr/2012/12/idrogono-ke-michanes-esoterikis-kafs/>

¹ **Μηχανές υδρογόνου και εσωτερικής καύσης:** Ο κινητήρας, η ανάρτηση και το αμάξωμα της **BMW Hydrogen 7** προέρχονται από την προηγούμενη γενιά **BMW 760i** και **BMW 760Li**. Η **BMW** μπορεί να διανύσει περίπου **200** χιλιόμετρα με υδρογόνο και **500** χιλιόμετρα με βενζίνη. Η μέγιστη ισχύς είναι **260 hp**, η τελική ταχύτητα (ηλεκτρονικά περιορισμένη) είναι **230 km/h** και τα **0-100 km/h** χρειάζονται **9,5 δευτερόλεπτα**. Περιγραφή: **1.** Δεξαμενή υγρού υδρογόνου (LH₂) – **2.** Κάλυμμα δεξαμενής υδρογόνου – **3.** Σωλήνας παροχής υδρογόνου στη δεξαμενή – **4.** Γραμμή ασφαλείας στη βαλβίδα ασφαλείας – **5.** Βοηθητική μονάδα με εναλλάκτη θερμότητας H₂ και έλεγχος δεξαμενής υδρογόνου Μονάδα **6.** Διπλό καύσιμο κινητήρα – **7.** Πολλαπλή εισαγωγής με γραμμή παροχής υδρογόνου – **8.** Σύστημα διαχείρισης εκπομπών υδρογόνου (BMS) – **9.** Δεξαμενή βενζίνης – **10.** Βαλβίδα ρύθμισης πίεσης.



3.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα

1ος) Μηδενικές εκπομπές CO₂: Η καύση υδρογόνου παράγει μόνο νερό ως υποπροϊόν, μειώνοντας σημαντικά τις εκπομπές (Smith. J, 2020).

2ος) Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα: Το υδρογόνο έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους, παρέχοντας μεγαλύτερη απόδοση (Johnson. A, 2019).

3ος) Ταχύτητα ανάφλεξης: Το υδρογόνο έχει υψηλότερη ταχύτητα ανάφλεξης, η οποία μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του κινητήρα (Brown. T, 2018).

Μειονεκτήματα

1ος) Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου: Το αέριο υδρογόνο έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου και μπορεί να απαιτεί μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης (Green. S, 2017).

2ος) Διαχείριση ανάφλεξης: Η χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης του υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε προανάφλεξη ή έκρηξη (Taylor. R, 2016).

3.2.1 Τεχνολογίες Καύσης

Οι κύριες τεχνολογίες καύσης του H₂-ICE περιλαμβάνουν:



Εικόνα 3.10 Τι είναι το υδρογόνο ICE; Επισκόπηση Hydrogen ICE, Πηγή:

<https://www.horiba.com/twn/automotive/applications/emissions-performance-and-durability/exhaust-emissions/hydrogen-ice/>



☛ **Συμβατική καύση σπινθήρα:** Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί έναν σπινθήρα για την ανάφλεξη ενός μείγματος υδρογόνου-αέρα. Η αποτελεσματικότητα και η καθαρότητα της καύσης εξαρτώνται από την ομοιογένεια του μείγματος και τον ακριβή χρονισμό ανάφλεξης (Heywood. J. B, 1988).

☛ **Ελεγχόμενη καύση πολλαπλών σπινθήρων:** Η χρήση πολλαπλών σπινθήρων βελτιώνει την ανάφλεξη του μείγματος υδρογόνου-αέρα, με αποτέλεσμα την ταχύτερη και αποτελεσματικότερη καύση. Αυτό μειώνει τον κίνδυνο πρόωρης ανάφλεξης και έκρηξης (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

☛ **Καύση με Αποφευχθέν Αδρανές Μίγμα:** Η προσθήκη αδρανών αερίων όπως το άζωτο μπορεί να μειώσει τις θερμοκρασίες καύσης, μειώνοντας έτσι τον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου (NOx). Αυτή η τεχνολογία είναι πολύ χρήσιμη για τη βελτίωση των εκπομπών ρύπων (Richer. R & Hally. J, 2007).

✓ **Έγχυση Υδρογόνου**

Η έγχυση υδρογόνου είναι μια τεχνολογία που εγχέει υδρογόνο απευθείας στον κύλινδρο του κινητήρα. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι έγχυσης:

☛ **Άμεση έγχυση:** Το υδρογόνο εγχέεται απευθείας στον κύλινδρο κατά τη φάση συμπίεσης. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του όγκου του καυσίμου και του χρονισμού ανάφλεξης (Evans. L, 2011).

☛ **Εμμεση έγχυση:** Το υδρογόνο αναμιγνύεται με αέρα πριν εισέλθει στον κύλινδρο. Αυτή η μέθοδος είναι σχετικά απλή, αλλά θα προκαλέσει πρόωρη ανάφλεξη λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας ανάφλεξης του υδρογόνου (Clark. P, 2015).

✓ **Ανάφλεξη με σπινθήρα**

Η ανάφλεξη με σπινθήρα είναι μια παραδοσιακή μέθοδος ανάφλεξης που παράγει έναν σπινθήρα για την ανάφλεξη του μείγματος καυσίμου-αέρα. Στους κινητήρες υδρογόνου, αυτή η προσέγγιση πρέπει να ρυθμιστεί για να αποφευχθεί η προανάφλεξη και η έκρηξη (Johnson. A, 2019).



✓ Ανάφλεξη με συμπίεση

Η ανάφλεξη με συμπίεση είναι λιγότερο συχνή στους κινητήρες υδρογόνου λόγω των προκλήσεων που σχετίζονται με την πρόωγη ανάφλεξη. Ωστόσο, οι πειραματικές τεχνικές προσπαθούν να ενσωματώσουν αυτή την προσέγγιση για να βελτιώσουν την απόδοση και την αποδοτικότητα (Davis. K, 2013).

3.2.2 Χαρακτηριστικά Λειτουργίας

Τα χαρακτηριστικά ενός μονοκύλινδρου κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου είναι πολλά: για βελτιστοποίηση της απόδοσης, για ελαχιστοποίηση των εκπομπών και για διασφάλιση ασφαλούς καύσης υδρογόνου. Ακολουθεί μια ανάλυση των κύριων χαρακτηριστικών αυτής της τεχνολογίας.



Εικόνα 3.11 Κινητήρας θαύμα βάζει τέλος στο Diesel - Καίει υδρογόνο και φτάνει έως τα 4.800 κ. εκ., Πηγή: <https://www.carandmotor.gr/nea/kinitiras-4800-kek-kaiei-ydrogono-anti-gia-diesel>

Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου αναλύονται παρακάτω με όλες τις παραμέτρους τους:



1ος) Απόδοση καύσης (Combustion efficiency): Απόδοση καύσης και ένας μονοκύλινδρος κινητήρας υδρογόνου είναι ένα από τα πιο ζωτικά χαρακτηριστικά. Η καύση του υδρογόνου δεν είναι παρόμοια με αυτή των τυπικών καυσίμων όπως η **βενζίνη** ή ακόμα και το **πετρέλαιο** λόγω κάποιων μοναδικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του υδρογόνου. Αυτές οι ιδιότητες είναι που καθιστούν δυνατούς κινητήρες υψηλής θερμικής απόδοσης και χαμηλών εκπομπών ρύπων. Ως εκ τούτου, το υδρογόνο γίνεται ιδανικό καύσιμο για φιλικές προς το περιβάλλον εφαρμογές.

3.2.3 Οι παράμετροι του Υδρογόνου και η Επίδραση τους στην Απόδοση Καύσης μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου

≡ **Υψηλή Ταχύτητα Καύσης (High Burning Rate):** Το υδρογόνο έχει μεγαλύτερη ταχύτητα καύσης από τα παραδοσιακά καύσιμα. Αυτό σημαίνει ότι όταν το υδρογόνο καίγεται, καίγεται πιο γρήγορα όταν αναμειγνύεται με τον αέρα, επομένως η πλήρης καύση απαιτεί μικρότερο χρονικό διάστημα για να συμβεί αυτή η ταχεία καύση βελτιώνει τη θερμική απόδοση του κινητήρα, καθώς μειώνει τις απώλειες θερμότητας στα τοιχώματα των κυλίνδρων (Heywood. J. B, 1988). Η γρήγορη καύση με υδρογόνο είναι πολύ πλεονεκτική σε σχέση με τους μονοκύλινδρους κινητήρες όπου η βελτιστοποίηση της απόδοσης καύσης είναι πολύ σημαντική.

≡ **Ευρύ Φάσμα Ευφλεκτότητας (Wide Flammability Range):** Το υδρογόνο είναι **εύφλεκτο** σε μεγάλο εύρος. μπορεί να αναφλεγεί με μεγαλύτερη αναλογία **καυσίμου/αέρα** από τη βενζίνη. Αυτό επιτρέπει στον κινητήρα να λειτουργεί με πολύ άπαχα μείγματα καυσίμων, μειώνοντας τη χρήση υδρογόνου και αυξάνοντας την απόδοση καυσίμου. Η δυνατότητα εργασίας με πολύ άπαχα μείγματα είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική σε μικρά φορτία, όπου μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω η θερμική απόδοση (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

≡ **Υψηλή Θερμική Απόδοση (High Thermal Efficiency):** Η θερμική απόδοση ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου είναι συνήθως υψηλότερη από εκείνη των κινητήρων που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Αυτό συμβαίνει επειδή το υδρογόνο επιτυγχάνει εξαιρετικά αποτελεσματική μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμική ενέργεια κατά την καύση. Η ενεργειακή πυκνότητα μάζας του υδρογόνου



σε επίπεδο μονάδας είναι υψηλή και η καύση έχει ως αποτέλεσμα περισσότερη ενθαλπία ενώ επιτυγχάνεται η ελάχιστη απώλεια θερμικής ενέργειας. Χρησιμεύει στην αύξηση της απόδοσης του κινητήρα και στη μείωση της ποσότητας της σπατάλης θερμότητας (Turns. S. R, 2000).

Προσοχή!!! Παρά τα πλεονεκτήματά του, η χρήση υδρογόνου ως καύσιμο έχει ορισμένες προκλήσεις. Η ταχεία καύση που μπορεί να οδηγήσει σε προανάφλεξη και χτύπημα από υδρογόνο προκαλεί μειωμένη απόδοση και φθορά του κινητήρα. Σε τέτοια προβλήματα, ο **ακριβής χρονισμός της ανάφλεξης** είναι ζωτικής σημασίας, καθώς και τα συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας κυλίνδρου και ψυκτικού. Επιπλέον, η τεχνολογία έγχυσης καυσίμου και μπουζί που χρησιμοποιείται μπορεί να διασφαλίσει τη σωστή καύση εκτός από την αποφυγή άλλων φαινομένων που δεν χρειάζονται σε ένα σύστημα (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).

Το υδρογόνο καίγεται με υψηλή απόδοση και χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων ρύπων επειδή το κύριο προϊόν καύσης του είναι το νερό. Ενώ οι εκπομπές NO_x μπορεί να είναι υψηλές λόγω της υψηλής θερμοκρασίας καύσης, τόσο η **ανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR - Exhaust Gas Recirculation)** όσο και οι τεχνολογίες τριών κατευθύνσεων καταλύτη μπορούν να μειώσουν δραστικά αυτές τις εκπομπές (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

2ος) Χαμηλές Εκπομπές Ρύπων (Low Pollutant Emissions): Οι χαμηλές εκπομπές ρύπων είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Τα περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου είναι τεράστια γιατί η καύση του είναι πολύ μικρή ρύπανση σε σύγκριση με τη βενζίνη και το πετρέλαιο που είναι παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα.

☞ Χαμηλές Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα (CO_2) (Low Carbon Dioxide (CO_2) Emissions): Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μονοκύλινδρων κινητήρων υδρογόνου είναι ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι σχεδόν μηδενικές. Από την άλλη πλευρά, όταν καίγεται, το υδρογόνο παράγει νερό ως το κύριο υποπροϊόν του και δεν έχει άνθρακα στη σύνθεσή του. Επομένως, επιτυγχάνει πλήρη απουσία CO_2 στις εκπομπές (Heywood. J. B, 1988). Αυτό το καθιστά πολύ



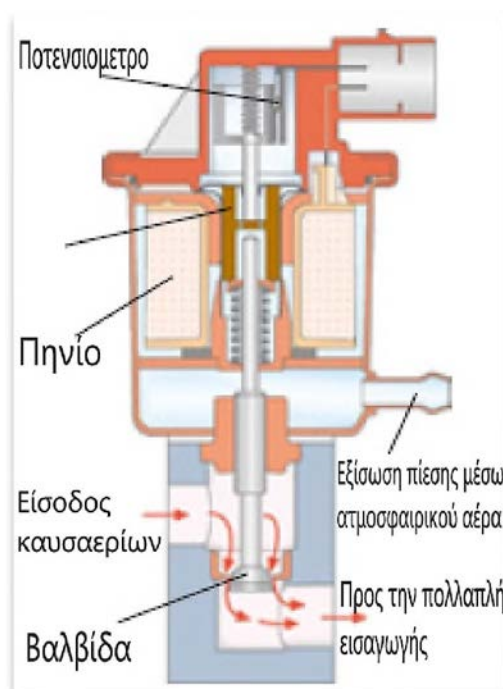
καλύτερο από τα ορυκτά καύσιμα επειδή οδηγούν σε υψηλά επίπεδα παραγωγής CO₂, ενισχύοντας έτσι την υπερθέρμανση του πλανήτη.



🚗 Εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου (NO_x) (Emissions of Nitrogen Oxides (NO_x)): Παρόλο που οι μονοκύλινδροι κινητήρες υδρογόνου μπορούν να μειώσουν το CO₂ με μεγάλα περιθώρια, ενδέχεται να παράγουν οξείδια του αζώτου (NO_x) λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καύσης. Το NO_x παράγεται από την αντίδραση του αζώτου με το οξυγόνο σε υψηλές θερμοκρασίες. Στους κινητήρες υδρογόνου, τα επίπεδα NO_x μπορεί να είναι υψηλά, καθώς οι θερμοκρασίες καύσης μπορούν εύκολα να φτάσουν σε υψηλά επίπεδα λόγω της ταχείας και πλήρους καύσης του υδρογόνου (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

Όμως υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την ελάττωση των εκπομπών NO_x σε μηχανές υδρογόνου:

1. Ανακυκλοφορία Καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation):
Επιτυγχάνεται με τη μείωση των θερμοκρασιών καύσης μέσω της αραίωσης του μείγματος φρέσκου καυσίμου-αέρα με καυσαέρια. Η μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου και της θερμοκρασίας του μίγματος καύσης μειώνει σημαντικά τα επίπεδα των εκπομπών NO_x (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).



Εικόνα 3.12 EGR VALVE, ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ, Πηγή: <https://autoalvanoudis.gr/egr-valve-anakyklosi-kafsaerion/>



2. Χρονισμός Ανάφλεξης και Έλεγχος Καυσίμου (Ignition Timing and Fuel Control): Για να μειωθούν οι εκπομπές **NO_x**, ο χρονισμός ανάφλεξης μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια και η αναλογία **καυσίμου - αέρα** να διαχειρίζεται σωστά. Οι υψηλές θερμοκρασίες καύσης ενθαρρύνουν επίσης το σχηματισμό **NO_x**. Η καθυστερημένη ανάφλεξη μειώνει τις θερμοκρασίες καύσης, ενώ μια υπερβολικά πλούσια ή υπερβολικά λιτή λειτουργία μπορεί επίσης να ελέγξει την παραγωγή **NO_x** (Heywood. J. B, 1988).

3. Καταλυτικοί Μετατροπείς (Catalytic Converters): Οι καταλυτικοί μετατροπείς τριών κατευθύνσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των εκπομπών **NO_x**. Οι καταλύτες σε αυτή την περίπτωση είναι ικανοί να οδηγούν χημικές αντιδράσεις που μετατρέπουν τα **NO_x** σε άζωτο και οξυγόνο, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές αζώτου πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα (Turns. S. R, 2000).

Προσοχή!!! Οι χαμηλές εκπομπές των μονοκύλινδρων κινητήρων εσωτερικής καύσης υδρογόνου έχουν ουσιαστική θετική επίδραση στο περιβάλλον, πολύ καλύτερα από εκείνους τους παραδοσιακούς κινητήρες που καίνε ορυκτά καύσιμα. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία υποστηρίζει τις βιώσιμες μεταφορές και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου: ιδανική για περιοχές αυστηρής περιβαλλοντικής ρύθμισης με ανάγκες καθαρής ενέργειας.

3ος) Ασφάλεια και Διαχείριση Καυσίμου (Safety and Fuel Management): Το χαρακτηριστικό ασφάλειας και διαχείρισης καυσίμου είναι πολύ σημαντικό για τους μονοκύλινδρους κινητήρες υδρογόνου εσωτερικής καύσης λόγω του καυσίμου που χρησιμοποιούν. Το υδρογόνο είναι ένα πολύ εύφλεκτο ελαφρύ αέριο που απαιτεί ειδικά συστήματα και τεχνολογίες για **αποθήκευση, χειρισμό και ασφαλή** καύση με αυτό. Οι κινητήρες έχουν σχεδιαστεί με περισσότερη από τη συνηθισμένη προσοχή για να διασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία και να κάνουν το καύσιμο να εξυπηρετεί τα άκρα της απόδοσης.



3.2.4 Οι παράμετροι του Υδρογόνου στην Ασφάλεια και στη Χρήση Υδρογόνου μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου

☞ **Οι Ιδιότητες του Υδρογόνου και η Ασφάλεια (Hydrogen Properties and Safety):** Υδρογόνο, το ότι είναι το ελαφρύτερο και πιο άφθονο χημικό στοιχείο στο σύμπαν και έχοντας μοναδικά χαρακτηριστικά επηρεάζει την εφαρμογή του ως καύσιμο. Είναι πολύ εύφλεκτο και μπορεί να αναφλεγεί σε ένα πολύ ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων στον αέρα (**4-75% κατ' όγκο**) με χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης (Heywood. J. B, 1988). Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν το υδρογόνο εύκολα επιρρεπές σε προανάφλεξη και ανάκρουση, επομένως σημαντικές ειδικές προφυλάξεις ασφαλείας κατά τον χειρισμό του.

☞ **Συστήματα Αποθήκευσης Υδρογόνου (Hydrogen Storage Systems):** Η αποθήκευση σε μονοκύλινδρο σε υδρογόνο απαιτεί δεξαμενές υψηλής πίεσης, συνήθως από σύνθετα υλικά όπως ανθρακονήματα ή κράματα αλουμινίου, με ικανότητα να αντέχουν πολύ υψηλές πιέσεις (έως **700 bar**) (Verhelst. S & Wallner. T, 2009). Είναι σχεδιασμένα με πολλαπλά στρώματα και ενσωματωμένες βαλβίδες ασφαλείας ώστε να μην επιτρέπουν τυχόν διαρροές που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα περιστατικά.

☞ **Ρυθμιστές Πίεσης και Βαλβίδες Ασφαλείας (Pressure Regulators and Safety Valves):** Οι ρυθμιστές πίεσης είναι σημαντικοί για την ασφαλή μεταφορά υδρογόνου από τη δεξαμενή στον κινητήρα. Μειώνουν την υψηλή πίεση υδρογόνου σε ασφαλή επίπεδα για τον κινητήρα, γεγονός που με τη σειρά του επιτρέπει στο καύσιμο να ρέει ήπια και προστατεύει από υπερβολική πίεση που μπορεί να προκαλέσει **διαρροές ή εκρήξεις** (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014). Οι **βαλβίδες ασφαλείας** και οι **ανιχνευτές διαρροών** αποτελούν επίσης μέρος του συστήματος για άμεση δράση σε περίπτωση διαρροής.



3.2.5 Οι παράμετροι του Υδρογόνου στην διαχείριση του καυσίμου μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου

⇒ **Σύστημα Παροχής Καυσίμου (Fuel Supply System):** Το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου στοχεύει στη μέτρηση υδρογόνου στον κύλινδρο. Αυτό γίνεται από **μπεκ** υψηλής ακρίβειας, τα οποία εάν δεν λειτουργήσουν σωστά θα προκαλούσαν υψηλούς κινδύνους προανάφλεξης και επίσης σπάταλη καύση. Απαιτείται ακριβής διαχείριση της ροής του υδρογόνου τόσο για τη διατήρηση της ασφάλειας του κινητήρα όσο και για τη διασφάλιση της παραγωγικότητάς του (Turns. S. R, 2000).

⇒ **Μονάδα Ελέγχου Κινητήρα (Engine Control Unit (ECU)):** Η ECU είναι ο εγκέφαλος του συστήματος διαχείρισης καυσίμου και ασφάλειας κινητήρα. Λαμβάνει δεδομένα από τους αισθητήρες του όπως ο αισθητήρας πίεσης ή θερμοκρασίας για να προσαρμόσει το χρόνο ανάφλεξης και την παροχή καυσίμου, δηλαδή η προσαρμογή των συνθηκών λειτουργίας του κινητήρα που ποικίλλουν ανάλογα με το φορτίο και τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014). Η ECU το κάνει αυτό προσαρμόζοντας τη διαχείριση βελτιώνοντας έτσι τις επιδόσεις και αποτρέποντας καταστάσεις.

⇒ **Σύστημα Ανίχνευσης Διαρροών (Leak Detection System):** Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της ασφάλειας, τα συστήματα ανίχνευσης διαρροών τοποθετούνται σε μονοκύλινδρους κινητήρες υδρογόνου. Αυτά χρησιμοποιούν αισθητήρες υδρογόνου για την ανίχνευση οποιασδήποτε μορφής διαρροών στο σύστημα καυσίμου. Όπου μπορεί να διακόψει την παροχή καυσίμου εάν ανιχνευθεί διαρροή και επίσης να ενεργοποιήσει βαλβίδες ασφαλείας για να αποφευχθεί η διάχυση υδρογόνου συν πιθανές εκρήξεις (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

Προσοχή!!! Η ασφάλεια και η διαχείριση καυσίμου σε μονοκύλινδρους κινητήρες υδρογόνου εσωτερικής καύσης, όπως έχουμε συζητήσει, είναι πολύ σημαντική λόγω των ιδιοτήτων του υδρογόνου. Για τη διασφάλιση ασφαλούς και αποδοτικής λειτουργίας του κινητήρα με μειωμένο κίνδυνο ατυχημάτων καθώς και βελτιωμένη απόδοση καυσίμου, γίνεται μεγάλη χρήση προηγμένων τεχνολογιών και συστημάτων αποθήκευσης, παροχής και ελέγχου υδρογόνου.



4ος) Σχεδιασμός και Υλικά (Design and Materials): Ο σχεδιασμός και τα υλικά ενός μονοκύλινδρου κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου είναι πολύ σημαντικά για την **απόδοση**, την **αξιοπιστία** και τη **μεγάλη διάρκεια ζωής** του κινητήρα. Η καύση του υδρογόνου επιβάλλει συγκεκριμένες απαιτήσεις στο σχεδιασμό και την επιλογή υλικού λόγω των μοναδικών φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του υδρογόνου, όπως ο **υψηλός ρυθμός καύσης** και η **ευφλεκτότητα**. Το επόμενο τμήμα περιγράφει λεπτομερώς τα βασικά σχεδιαστικά στοιχεία μαζί με τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους κινητήρες.



Εικόνα 3.13 Κινητήρες υδρογόνου: Η καινοτομία, μονόδρομος για τις ιαπωνικές φιλοδοξίες,
Πηγή: <https://www.naftikachronika.gr/2024/01/10/kinitires-ydrogonou-i-kainotomia-monodromos-gia-tis-iaponikes-filodoxies/>

3.2.6 Οι παράμετροι του Υδρογόνου για τον σχεδιασμό και υλικών κατασκευής μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου

Συμπαγής Σχεδιασμός (Compact Design): Οι μονοκύλινδροι κινητήρες υδρογόνου έχουν συμπαγή σχεδιασμό και πολύ ελαφρύ, ιδανικό για μικρές εφαρμογές όπως μοτοσικλέτες, μικρά οχήματα και γεννήτριες. Η μείωση του συνολικού βάρους λόγω της συμπαγούς σχεδίασης αυξάνει περαιτέρω την απόδοση του κινητήρα, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές ρύπων (Heywood. J. B, 1988).





☞ **Ανθεκτική Κατασκευή (Durable Construction):** Οι υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που προκύπτουν από την καύση υδρογόνου απαιτούν τη χρήση ανθεκτικών υλικών σε κινητήρες υδρογόνου. Οποιοσδήποτε σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι το υδρογόνο καίγεται γρήγορα και με υψηλή απελευθέρωση ενέργειας, η οποία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στα εξαρτήματα του κινητήρα εάν δεν χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα υλικά (Turns. S. R, 2000).

☞ **Ψύξη και Διαχείριση Θερμότητας (Cooling and Heat Management):** Η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση υδρογόνου στον κινητήρα χρειάζεται κατάλληλα συστήματα ψύξης. Εάν πρόκειται να αποφευχθεί η **υπερθέρμανση**, η διαχείριση της θερμότητας γίνεται κρίσιμη, καθώς αυτό μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον κινητήρα και να μειώσει την απόδοση. Αυτό έχει δει τους σημερινούς κινητήρες υδρογόνου να υιοθετούν τη χρήση ψυκτικών καναλιών και υλικών ψυκτικού που είναι πολύ προηγμένα για να διατηρούν τις θερμοκρασίες σε αποδεκτά επίπεδα (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

☞ **Υλικά χρήσης - Κράματα Αλουμινίου και Χυτοσίδηρος (Materials used - Aluminum Alloys and Cast Iron):** Κράματα αλουμινίου και χυτοσίδηρος: κοινά σε πολλά μέρη κινητήρα, όπως μπλοκ κυλίνδρων και κυλινδροκεφαλή. Το αλουμίνιο ευνοείται για το μικρό του βάρος και την καλή θερμική αγωγιμότητα - που βοηθά στην ταχύτερη αποβολή της θερμότητας από τον κινητήρα - ενώ ο χυτοσίδηρος παρέχει μεγαλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις (Heywood. J. B, 1988).

☞ **Υλικά ανθεκτικά στη Διάβρωση (Corrosion Resistant Materials):** Λόγω της υψηλής τάσης του υδρογόνου να προκαλεί διάβρωση, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στον κινητήρα θα πρέπει να είναι ανθεκτικά σε αυτές τις συνθήκες. Τα ειδικά κράματα και επιστρώσεις για εξαρτήματα σε άμεση επαφή με το υδρογόνο, όπως μπεκ ψεκασμού καυσίμου και γραμμές καυσίμου, βασίζονται στην εξασφάλιση αντοχής στη φθορά και μακροπρόθεσμης αξιοπιστίας (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).





 **Υλικά υψηλής αντοχής για κινητά Μέρη (High Strength Materials for Moving Parts):** Για τα κινούμενα μέρη του κινητήρα, όπως το **έμβολο** και η **μπιέλα** χρησιμοποιούνται υλικά υψηλής αντοχής που μπορούν να αντέξουν τις δυναμικές δυνάμεις και τη σοβαρή φθορά λόγω της συνεχούς κίνησης. Τα **κράματα τιτανίου** και οι **ειδικά επεξεργασμένοι χάλυβες** είναι τυπικές επιλογές για αυτά τα εξαρτήματα, καθώς παρέχουν μεγάλη αντοχή και αντοχή στην καταπόνηση (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

 **Επικαλύψεις και Στεγανοποιήσεις (Coatings and Waterproofing):** Είναι σημαντικά για την προστασία των εσωτερικών μερών του κινητήρα από τη διάβρωση και τη φθορά. Επιστρώσεις, όπως κεραμικά και πολυμερή στρώματα, εφαρμόζονται για να αυξήσουν την αντοχή στη θερμότητα και τη χημική διάβρωση. Οι σύνθετες σφραγίδες, από την άλλη πλευρά, αντιστέκονται σε διαρροές καυσίμου και αερίου (Turns. S. R, 2000).

Προσοχή!!! Ένας μονοκύλινδρος κινητήρας εσωτερικής καύσης υδρογόνου είναι πολύ ευαίσθητος στην απόδοση και τη διάρκεια ζωής του με σωστά επιλεγμένα υλικά και προσεκτική σχεδίαση κινητήρα, που χρειάζεται ελαφριά υλικά **ανθεκτικά** στη **θερμότητα** και τη **διάβρωση** με τις ανάγκες για αποτελεσματική θερμική διαχείριση και αντοχή σε δυναμικές δυνάμεις. Η ανάπτυξη της μηχανικής επιστήμης οδηγεί στην εφεύρεση **νέων υλικών, σύνθετων υλικών** που είναι **ελαφριά, ανθεκτικά** σε διαβρωτικά περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας κατάλληλα για δυναμικά φορτία στα οποία υποβάλλονται, εκτός από τις καλές μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλή θερμοκρασία (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).



4 Κεφάλαιο Μέρη και Εξαρτήματα της Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου

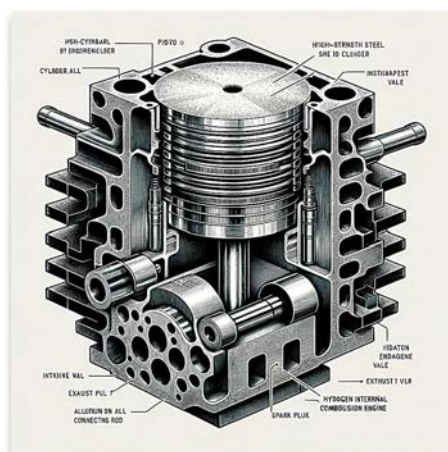
4.1 Μέρη της Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου

Η μονοκύλινδρη μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα που συνεργάζονται για να πραγματοποιηθεί η καύση του υδρογόνου και να μετατραπεί η θερμική ενέργεια σε μηχανική. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια εξαρτήματα της μηχανής, συνοδευόμενα από περιγραφές και σχήματα.

4.1.1 Αναλυτική Περιγραφή των Εξαρτημάτων

1. Κύλινδρος (Cylinder)

Ο κύλινδρος είναι όπου το έμβολο παλινδρομεί. Για το λόγο αυτό, η σχεδίαση του κυλίνδρου θα πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής, καθώς εγγυάται την ελεύθερη και εύκολη κίνηση του εμβόλου. Ο κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από υλικά πολύ υψηλής αντοχής όπως χυτοσίδηρος ή κράματα αλουμινίου για να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις που προκύπτουν από την καύση υδρογόνου (Heywood. J. B, 1988).



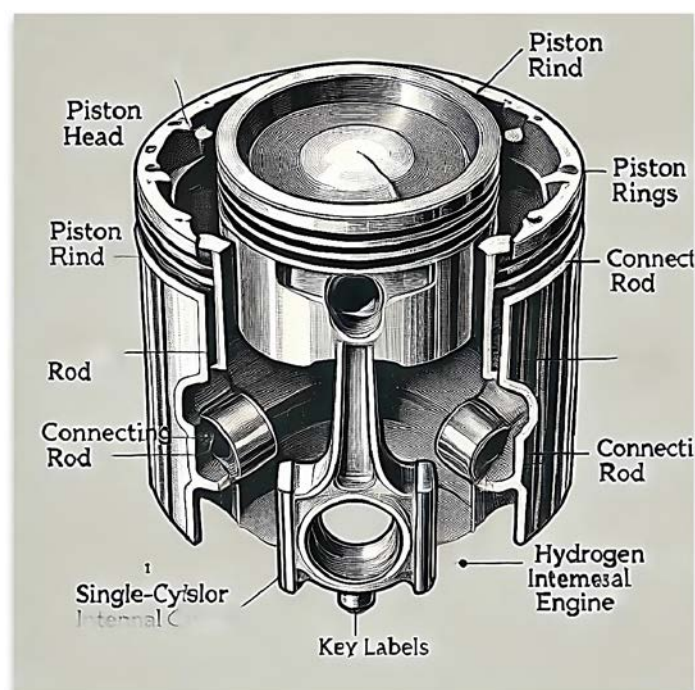
Σχήμα 1 Το παραπάνω σχέδιο περιγράφει τον κύλινδρο ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Η περιγραφή δείχνει τα βασικά εξαρτήματα του κυλίνδρου, συμπεριλαμβανομένου του εμβόλου, των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής, του μπουζί και της σύνδεσης



Σε έναν μονοκύλινδρο κινητήρα υδρογόνου, ο κύλινδρος λειτουργεί ως θάλαμος καύσης. Το μείγμα υδρογόνου και αέρα εισέρχεται στον κύλινδρο μέσω της βαλβίδας εισαγωγής. Αυτό γίνεται στην αρχή της φάσης συμπίεσης όπως συμπιέζεται από το έμβολο. Κατά τη φάση της καύσης, το αναφλεγμένο μπουζί προκαλεί ανάφλεξη του συμπιεσμένου μείγματος που οδηγεί σε έκρηξη που ωθεί προς τα κάτω το έμβολο. Η έκρηξη πρέπει να αντέχεται από ένα σχέδιο που επιτρέπει τη διέλευση της ενέργειας της καύσης σε κίνηση με απρόσκοπτο τρόπο (Turns. S. R, 2000).

2. Έμβολο (Piston)

Το έμβολο: αυτό είναι ένα παλινδρομικό τμήμα μέσα στον κύλινδρο. Συνήθως κατασκευάζεται από ελαφριά και ισχυρά υλικά όπως κράματα αλουμινίου για μείωση του βάρους και αύξηση της αντίστασης στις θερμοκρασίες που δημιουργούνται κατά την καύση υδρογόνου (Heywood. J. B, 1988).



Σχήμα 2 Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει το έμβολο ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Το σχήμα δείχνει λεπτομέρειες για δακτυλίους εμβόλου, κεφαλή εμβόλου και μπιέλα και πώς συνδέονται με τον στροφαλοφόρο άξονα.





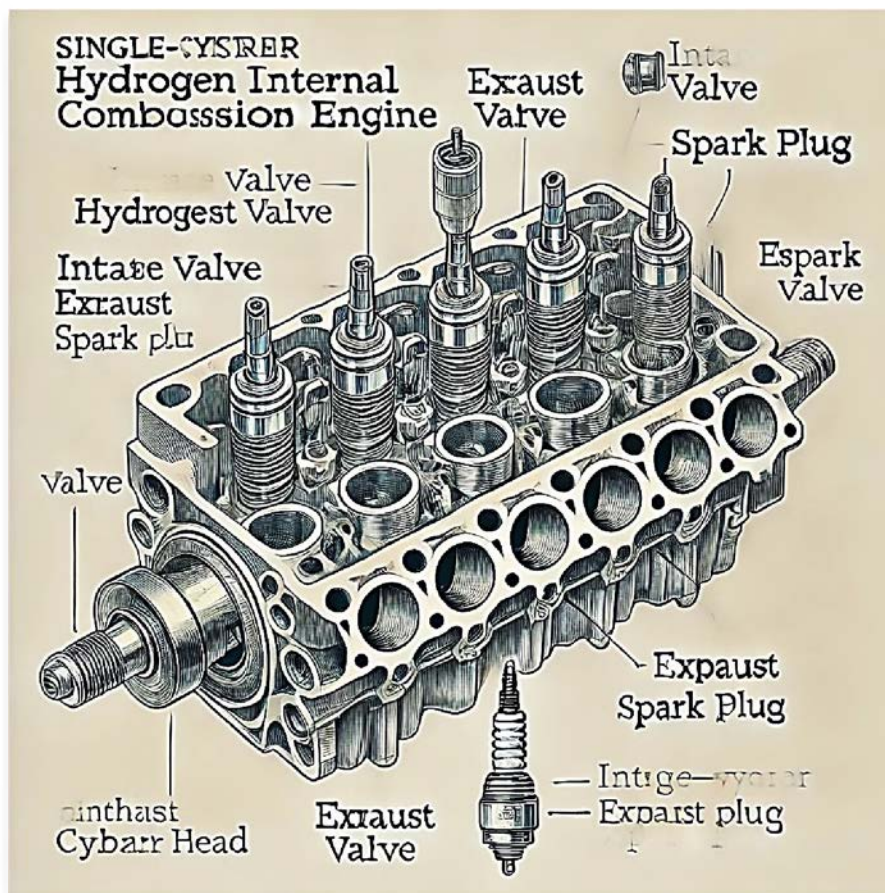
Η λειτουργία του εμβόλου είναι το κλειδί για τη λειτουργία του κινητήρα. Στη φάση εισαγωγής, το έμβολο κινείται προς το κάτω νεκρό σημείο. Με αυτόν τον τρόπο, επιτρέπει στο μείγμα **υδρογόνου-αέρα** να εισέλθει στον κύλινδρο. Κατά τη συμπίεση, το έμβολο κινείται προς το πάνω νεκρό σημείο συμπιέζοντας το μείγμα. Η καύση του μείγματος παράγει υψηλή πίεση, η οποία αναγκάζει το έμβολο προς τα κάτω κατά τη διάρκεια της διαστολής: μετατρέποντας την ενέργεια της καύσης σε κινητική ενέργεια (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014). Η κίνηση προς τα πάνω γίνεται ξανά από το έμβολο κατά την εξάτμιση καθώς αναγκάζει τα καυσαέρια έξω από τον κύλινδρο.

Η απόδοση καύσης επηρεάζεται επίσης από το σχήμα του εμβόλου και την επιφάνεια του. Συνήθως, η κορυφή του εμβόλου είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να επιτυγχάνει ομοιόμορφη κατανομή πίεσης και θερμοκρασίας ενώ λαμβάνει χώρα η καύση. Αυτό συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα και στη μείωση των εκπομπών ρύπων (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

Κεφαλή Κυλίνδρου και Βαλβίδες (Cylinder Head and Valves):

Ένας μονοκύλινδρος κινητήρας υδρογόνου εσωτερικής καύσης εξαρτάται από την κυλινδροκεφαλή και τις βαλβίδες του. Αυτό οφείλεται στο ότι ο σχεδιασμός και η λειτουργία αυτών των δύο εξαρτημάτων είναι πολύ ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της κατάλληλης ροής, **καύσης** και **αποβολής** του μείγματος **καυσίμου-αέρα**, διασφαλίζοντας επομένως την απόδοση και την ασφάλεια του κινητήρα.





Σχήμα 3 Το παραπάνω σχήμα δείχνει την κυλινδροκεφαλή και τις βαλβίδες ενός μονοκύλινδρου κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Δείχνει τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής συν το μπουζί και πώς είναι διατεταγμένες στην κυλινδροκεφαλή.

Κεφαλή Κυλίνδρου (Cylinder Head): Η κυλινδροκεφαλή εξηγείται ότι είναι το άνω τμήμα του κυλίνδρου που κλείνει το πάνω μέρος του κυλίνδρου και ενσωματώνει εξαρτήματα μέσω των οποίων μπορεί να εισαχθεί το καύσιμο, να ξεκινήσει η ανάφλεξη και τελικά να απελευθερωθεί η εξάτμιση. Η κεφαλή είναι κατασκευασμένη από υλικά ικανά να αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις - για παράδειγμα, χυτοσίδηρο ή κράματα αλουμινίου - για να εγγυηθεί ότι οι κινητήρες είναι ανθεκτικοί και λειτουργούν για μεγάλες περιόδους (Heywood. J. B, 1988).





Στην κυλινδροκεφαλή βρίσκεται ο θάλαμος καύσης όπου αναφλέγεται το μείγμα υδρογόνου και αέρα. Η γεωμετρία της ψύξης και των καναλιών της κεφαλής είναι σημαντική δεδομένου ότι έχει επίδραση στην απόδοση καύσης και τις εκπομπές ρύπων. Περιέχει επίσης διόδους για ψύξη, ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό για την πρόληψη της υπερθέρμανσης για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του κινητήρα εντός αποδεκτών ορίων (Turns. S. R, 2000).

 **Βαλβίδες Εισαγωγής και Εξαγωγής (Inlet and Exhaust Valves):** Η κυλινδροκεφαλή περιέχει τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής που καθορίζουν τη διέλευση αέρα/υδρογόνου προς/από τον κύλινδρο και τον κύλινδρο για τα καυσαέρια μετά την καύση. Κατά τη φάση εισαγωγής, οι βαλβίδες εισαγωγής ανοίγουν για να μπει το μίγμα **υδρογόνου-αέρα** στον κύλινδρο. Μετά την καύση, από την άλλη πλευρά, οι βαλβίδες εξαγωγής ανοίγουν για να επιτρέψουν την έξοδο των καυσαερίων (Heywood. J. B, 1988).

Ο σχεδιασμός της βαλβίδας είναι σημαντικός για την απόδοση. Οι βαλβίδες πρέπει να είναι κατασκευασμένες από υλικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες και να διαθέτουν μηχανισμούς κλεισίματος για να διασφαλίζεται η ερμητική στεγανοποίηση. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει διαρροή αερίου κατά τη λειτουργία του κινητήρα (Verhelst. S & Wallner. T, 2009). Εξίσου σημαντικός είναι ο σωστός χρονισμός στο άνοιγμα και το κλείσιμο της βαλβίδας που αναφέρεται ως χρονισμός βαλβίδας.

Ο χρονισμός των βαλβίδων στον κινητήρα υδρογόνου πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής επειδή το υδρογόνο έχει μοναδικές ιδιότητες ως καύσιμο. Είναι χαμηλής ενέργειας ανά μονάδα όγκου και καίγεται πολύ γρήγορα, απαιτώντας την τροποποίηση του σχεδιασμού των βαλβίδων και του συστήματος ανάφλεξης για αυτό (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).



Πιο συγκεκριμένα:

a) Βαλβίδα Εισαγωγής

Η βαλβίδα εισαγωγής επιτρέπει σε ένα μείγμα υδρογόνου και αέρα να εισέλθει στον κύλινδρο κατά τη φάση εισαγωγής. Καθώς το έμβολο κινείται προς τα κάτω, η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει, επιτρέποντας στο μείγμα να εισέλθει στον θάλαμο καύσης. Ο σχεδιασμός της βαλβίδας εισαγωγής είναι κρίσιμος για τη σωστή κατανομή του μείγματος εντός του κυλίνδρου, η οποία επηρεάζει άμεσα την απόδοση της καύσης (Heywood. J. B, 1988).

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που δημιουργούνται κατά την καύση, η βαλβίδα εισαγωγής είναι συνήθως κατασκευασμένη από υλικά υψηλής αντοχής στη θερμότητα, όπως κράμα νικελίου ή ανοξείδωτο χάλυβα. Ο ακριβής χρονισμός του ανοίγματος και του κλεισίματος της βαλβίδας εισαγωγής (χρονισμός βαλβίδας) είναι κρίσιμος για την απόδοση του κινητήρα επειδή επηρεάζει την ποσότητα και την αναλογία του μείγματος υδρογόνου/αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο (Turns. S. R, 2000).

b) Βαλβίδα Εξαγωγής

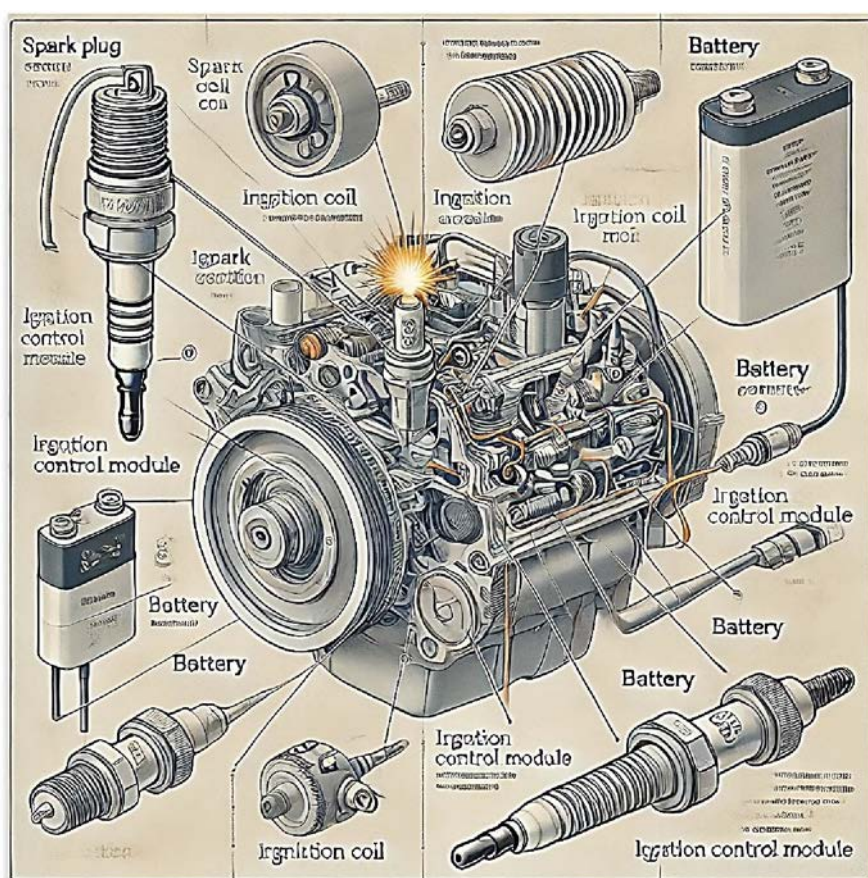
Η βαλβίδα εξαγωγής επιτρέπει στα καμένα καυσαέρια να εξέρχονται από τον κύλινδρο. Όταν το έμβολο κινείται προς τα πάνω μετά την καύση, η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει, επιτρέποντας στα καυσαέρια να εξέλθουν από τον κύλινδρο και να εισέλθουν στη συσκευή εξάτμισης. Όπως η βαλβίδα εισαγωγής, η βαλβίδα εξαγωγής πρέπει να είναι κατασκευασμένη από ανθεκτικά υλικά, καθώς εκτίθεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις κατά τη φάση της εξάτμισης (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

Η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει πριν από την έναρξη του επόμενου σταδίου εισαγωγής για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν υπολείμματα καυσαερίων στον κύλινδρο, διαφορετικά θα επηρεάσει την απόδοση της επακόλουθης καύσης. Η σωστή λειτουργία της βαλβίδας εξαγωγής είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της πίεσης εντός του κυλίνδρου και την επίτευξη της μέγιστης θερμικής απόδοσης του κινητήρα (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).



3. Σύστημα Ανάφλεξης (Ignition System):

Το σύστημα ανάφλεξης είναι ένα από τα πιο κρίσιμα εξαρτήματα ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Ο κύριος σκοπός του συστήματος ανάφλεξης είναι να παράγει έναν σπινθήρα που αναφλέγει το μείγμα υδρογόνου και αέρα στον κύλινδρο, προκαλώντας καύση και παράγοντας την ισχύ που απαιτείται για τη λειτουργία του κινητήρα.



Σχήμα 4 Το παραπάνω σχήμα δείχνει το σύστημα ανάφλεξης ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης. Το σχέδιο περιλαμβάνει το μπουζί, το πηνίο ανάφλεξης, τη μονάδα ελέγχου ανάφλεξης, την μπαταρία και τις συνδέσεις τους μέσα στο σύστημα.



Εξαρτήματα του Συστήματος Ανάφλεξης:

☞ **Μπουζί (Spark Plug):** Το μπουζί είναι το κύριο εξάρτημα που παράγει ηλεκτρικούς σπινθήρες στον κύλινδρο. Όταν το μείγμα **υδρογόνου-αέρα** συμπιέζεται στον κύλινδρο, το μπουζί δημιουργεί έναν σπινθήρα, αναφλέγοντας το μείγμα. Η θέση του μπουζί στην κυλινδροκεφαλή είναι κρίσιμη για την ομοιόμορφη και πλήρη καύση του μείγματος (Heywood. J. B, 1988). Τα μπουζί πρέπει να λειτουργούν με ακρίβεια για να παράγουν σπινθήρες στα σωστά διαστήματα και σε συγχρονισμό με την κίνηση του εμβόλου και το χρονισμό της βαλβίδας.

☞ **Πηνίο Ανάφλεξης (Ignition Coil):** Το πηνίο ανάφλεξης είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του ρεύματος υψηλής τάσης που απαιτείται από το μπουζί για τη δημιουργία σπινθήρα. Το πηνίο ανάφλεξης μετατρέπει το ρεύμα χαμηλής τάσης από την μπαταρία σε ρεύμα υψηλής τάσης, το οποίο στη συνέχεια μεταδίδεται στα μπουζί (Turns. S. R, 2000).

☞ **Μονάδα Ελέγχου Ανάφλεξης (Ignition Control Module):** Η μονάδα ελέγχου ανάφλεξης διαχειρίζεται τον ακριβή χρονισμό της δημιουργίας σπινθήρα. Στους σύγχρονους κινητήρες, αυτή η μονάδα μπορεί να είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα που λαμβάνει πληροφορίες από αισθητήρες και προσαρμόζει το χρόνο ανάφλεξης για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα και τη μείωση των εκπομπών (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).

☞ **Μπαταρία (battery):** Η μπαταρία παρέχει την αρχική ισχύ στο σύστημα ανάφλεξης. Αν και η μπαταρία δεν εμπλέκεται άμεσα στη δημιουργία του σπινθήρα, παρέχει το ρεύμα που απαιτείται για τη λειτουργία του πηνίου ανάφλεξης και της μονάδας ελέγχου ανάφλεξης.



4.1.2 Χρονισμός Ανάφλεξης μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου

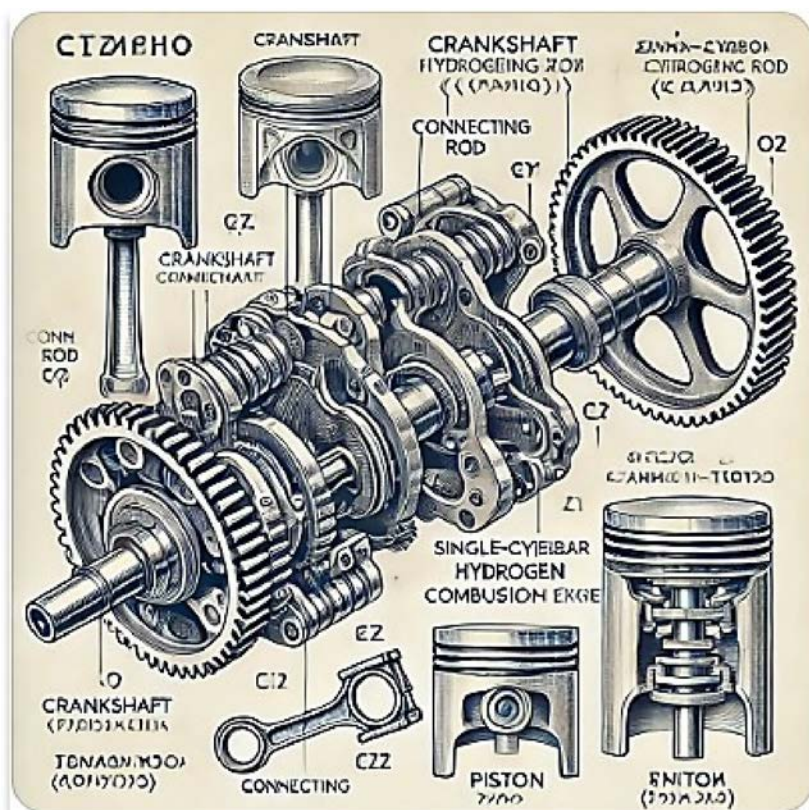
Ο χρονισμός ανάφλεξης είναι όταν ο σπινθήρας είναι αναμμένος, που σημαίνει όταν το υδρογόνο/αέρας μέσα στον κύλινδρο αναφλέγεται. Ο σωστός χρονισμός είναι πολύ σημαντικός για την απόδοση του κινητήρα επειδή έχει επίδραση στην πίεση στον κύλινδρο κατά το στάδιο της καύσης και ως εκ τούτου στην παραγωγή ισχύος (Verhelst. S & Wallner. T, 2009). Στους κινητήρες υδρογόνου, ο χρονισμός πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής, καθώς το υδρογόνο καίγεται πολύ γρήγορα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε **προανάφλεξη** ή **ανάκρουση** εάν δεν ελέγχεται καλά.

Ένα σημαντικό ζήτημα στο σύστημα ανάφλεξης του κινητήρα υδρογόνου είναι πώς να αποτραπεί η προανάφλεξη και το χτύπημα, καθώς η υψηλή ευφλεκτότητα και ο γρήγορος χρόνος ανάφλεξης καθιστούν πολύ εύκολο να συμβούν. Ως απάντηση σε αυτό το πρόβλημα, τα συστήματα ανάφλεξης έχουν ρυθμιστεί με ακρίβεια ώστε να διαθέτουν ακριβή έλεγχο σπινθήρα και διαθέτουν την ικανότητα ρύθμισης του χρονισμού σύμφωνα με τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα (Turns. S. R, 2000).

4. Στροφαλοφόρος Άξονας και Μπιέλα (Crankshaft and Connecting Rod):

Ο στροφαλοφόρος άξονας και η μπιέλα. Σε έναν μονοκύλινδρο κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου, η παλινδρομική κίνηση από το έμβολο είναι η βασική μετατροπή σε περιστροφική κίνηση. Το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή μηχανικής ισχύος.





Σχήμα 5 Το παραπάνω σχήμα δείχνει έναν στροφαλοφόρο άξονα και μια μπιέλα του μονοκύλινδρου κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Το σχέδιο δείχνει συνδέσεις του στροφαλοφόρου άξονα και της μπιέλας τόσο με το έμβολο όσο και με τον κύλινδρο σε μια κατασκευή

☛ **Στροφαλοφόρος Άξονας (Crankshaft):** Ο στροφαλοφόρος άξονας, είναι ένα από αυτά τα κεντρικά μέρη. Βρίσκεται στον κινητήρα για να μετατρέψει την κίνηση προς τα πάνω και προς τα κάτω του εμβόλου σε περιστροφική κίνηση. Ο στροφαλοφόρος άξονας είναι βασικά ένας άξονας που έχει σφήνες. Οι σφήνες έχουν διαφορετική γωνία και επιτρέπουν τη μετατροπή της κάθετης κίνησης σε κυκλική κίνηση (Heywood. J. B, 1988).

Ο στροφαλοφόρος άξονας είναι κατασκευασμένος από **ατσάλι ή κράματα υψηλής αντοχής**. Αυτό αντιστέκεται στις υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του κινητήρα. Ο σχεδιασμός του στροφαλοφόρου άξονα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ικανότητά του να αντέχει τα φορτία που δημιουργούνται από την καύση υδρογόνου και να λειτουργεί με δράση χωρίς τριβές έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση (Turns. S. R, 2000).





 **Μπιέλα (Biela):** Η μπιέλα είναι ένα μέρος. Συνδέει το **έμβολο** με τον **στροφαλοφόρο άξονα**. Η **μπιέλα** είναι ένας σημαντικός σύνδεσμος που μεταδίδει δυνάμεις από το έμβολο στον στροφαλοφόρο άξονα. Επιτρέποντας έτσι την παλινδρομική κίνηση να μετατραπεί σε **περιστροφική κίνηση**. Η **μπιέλα** πρέπει να είναι πολύ ισχυρή επειδή αντιμετωπίζει υψηλές δυνάμεις κατά τη λειτουργία του κινητήρα (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

Σε κινητήρες υδρογόνου, όπου η καύση είναι ταχεία και παράγει υψηλές πιέσεις, η **μπιέλα** υπόκειται σε πολύ υψηλή μηχανική φόρτιση και επομένως πρέπει να είναι κατασκευασμένη από αντίστοιχα ισχυρά υλικά. Είναι συνήθως κατασκευασμένο από **χάλυβα** ή **κράματα αλουμινίου - υψηλής αντοχής με ελαφρότητα** για μείωση της **αδράνειας** και καλύτερη **απόδοση** της **μηχανής** (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).

Στη φάση της καύσης, υπάρχει ανάφλεξη του μίγματος **υδρογόνου - αέρα** υψηλής πίεσης, το οποίο σπρώχνει το έμβολο προς τα κάτω. Αυτή η κίνηση μεταδίδεται στη συνέχεια μέσω της μπιέλας στον στροφαλοφόρο άξονα. Ο στροφαλοφόρος άξονας αρχίζει να περιστρέφεται. Η κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα τον αναγκάζει να ανεβάσει το έμβολο για έναν νέο κύκλο: αναρρόφηση. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ στροφαλοφόρου άξονα και μπιέλας είναι πολύ βασική για τη δράση του κινητήρα αφού μετατρέπει την ενέργεια καύσης σε χρήσιμο μηχανικό έργο (Heywood. J. B, 1988).

Η κατασκευή και ο σχεδιασμός του στροφαλοφόρου άξονα και της μπιέλας είναι σημαντικά για κάθε κινητήρα υδρογόνου. Μεταξύ των προκλήσεων είναι ο χειρισμός των θερμοκρασιών και των πιέσεων που είναι τόσο υψηλές λόγω της καύσης υδρογόνου και η μείωση της φθοράς λόγω της συνεχούς τριβής. Η εφαρμογή σύγχρονων υλικών και τεχνολογιών κατασκευής έχουν κάνει τα εξαρτήματα να έχουν βελτιωμένη απόδοση και διάρκεια ζωής: υψηλότερα (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

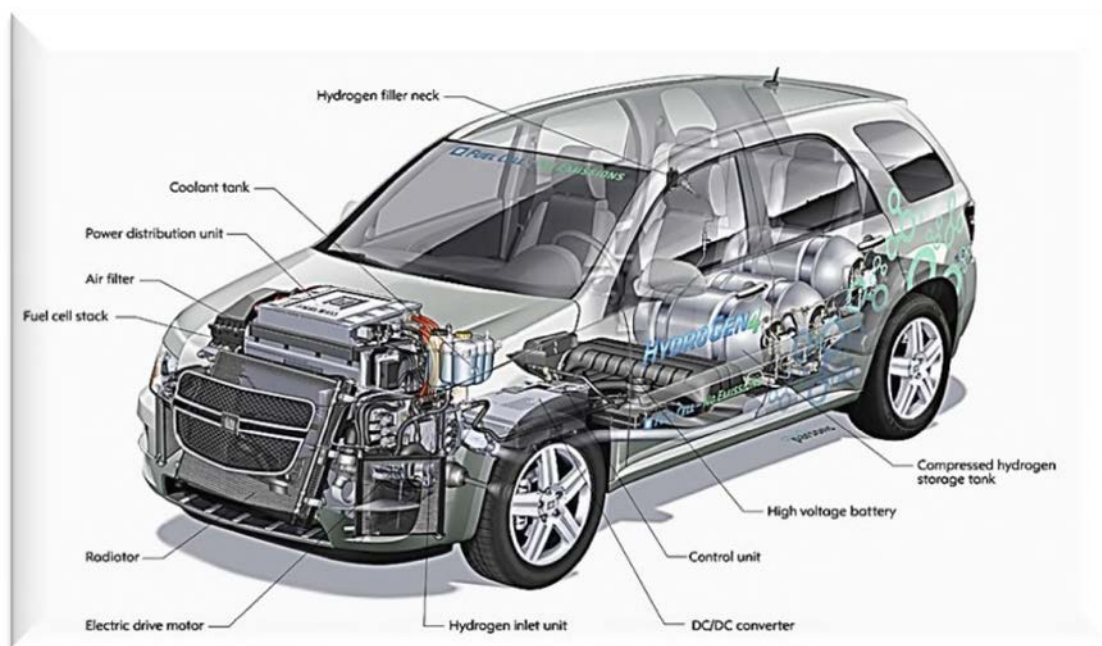


[illegible]



4.1.3 Στοιχεία του Συστήματος Καυσίμου μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου

Το σύστημα καυσίμου αποθηκεύει και παρέχει υδρογόνο στους κυλίνδρους του κινητήρα. Περιλαμβάνει τη δεξαμενή καυσίμου, την αντλία και τα μπεκ.



Εικόνα 4.14 Οχήματα κυψελών καυσίμου: ένα σημαντικό βήμα προς τη διάδοση, Πηγή: <https://www.pemptousia.gr/2017/02/aftokinita-me-kipseles-kafsimou-ena-simantiko-vima-gia-ti-diadosi-tous/>

🚗 **Δεξαμενή Υδρογόνου (Hydrogen Tank):** Η δεξαμενή υδρογόνου είναι όπου αποθηκεύεται το καύσιμο υδρογόνο. Το υδρογόνο συνήθως αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση (έως **700 bar**) σε ειδικές δεξαμενές κατασκευασμένες από υλικά όπως **ανθρακονήματα** ή **κράματα αλουμινίου** για να είναι **ανθεκτικά** και **ελαφριά** (Verhelst. S & Wallner. T, 2009). Αυτές οι δεξαμενές πρέπει να συντηρούνται με πολύ σκληρές συνθήκες, ώστε να μην υπάρχει διαρροή και η ασφάλεια διασφαλίζεται από την εξαιρετική αντίσταση.

🚗 **Ρυθμιστής Πίεσης (Pressure Regulator):** Είναι υπεύθυνος για τη μείωση της υψηλής πίεσης υδρογόνου στη δεξαμενή σε χαμηλότερη πίεση που είναι κατάλληλη για το σύστημα καυσίμου και τον κινητήρα. Πρέπει επίσης να αποτραπεί



η υπερβολική ροή καυσίμου και να εξασφαλιστεί η σταθερή παροχή υδρογόνου στον κινητήρα (Heywood. J. B, 1988).

☞ **Σύστημα Παροχής Καυσίμου (Fuel Supply System):** Το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου περιλαμβάνει σωλήνες και σωλήνες που μεταφέρουν το υδρογόνο από τη δεξαμενή στον εγχυτήρα. Το υδρογόνο είναι ένα μικροσκοπικό μόριο και τα περισσότερα υλικά τείνουν να το παγιδεύουν, προκαλώντας **ευθραυστότητα** ή **ρωγμές** του υλικού, επομένως οι σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από υλικά ανθεκτικά στο υδρογόνο. Αυτό αποτρέπει τις διαρροές και τη φθορά λόγω της αλληλεπίδρασης του υδρογόνου με άλλα υλικά (Turns. S. R, 2000).

☞ **Εγχυτήρας Καυσίμου (Fuel Injector):** Το μπεκ ψεκασμού καυσίμου: πολύ ζωτικής σημασίας στο σύστημα καυσίμου. Ελέγχει την ποσότητα του υδρογόνου που εισάγεται στον κύλινδρο και πόσο καλά αναμιγνύεται με τον αέρα για καύση. Η έγχυση διέπει επίσης την αναλογία υδρογόνου-αέρα. Πρέπει να είναι εξαιρετικά ακριβής επειδή αυτή η αναλογία επηρεάζει άμεσα την απόδοση και τις εκπομπές, σύμφωνα με τους (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).

☞ **Αισθητήρες και Μονάδα Ελέγχου (Sensors and Control Unit):** Το σύστημα καυσίμου έχει ότι οι αισθητήρες παρακολουθούν τη ροή και τις συνθήκες υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας αισθητήρων. Η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να ρυθμίσει το μπεκ για να εξασφαλίσει τη σωστή καύση (Verhelst. S & Wallner. T, 2009). Αυτό με τη σειρά του βοηθά στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα στη μείωση των εκπομπών.

Προσοχή!!! Το σύστημα καυσίμου του κινητήρα υδρογόνου είναι η έγχυση ενός κατάλληλου μίγματος υδρογόνου και αέρα στον κύλινδρο. Ακριβώς όπως στην προανάφλεξη ή την ακρίβεια στην παροχή καυσίμου είναι επίσης πολύ σημαντική, καθώς το υδρογόνο είναι πολύ εύφλεκτο και μπορεί να προκαλέσει καταστάσεις εάν δεν αναμιχθεί τέλεια με τον αέρα (Heywood. J. B, 1988).

Σήμερα, με την τρέχουσα ηλεκτρονική τεχνολογία, η διαχείριση ενός τέτοιου συστήματος καυσίμου εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια όσον αφορά τον έλεγχο τόσο της ροής όσο και της πίεσης του υδρογόνου. Επίσης, αυτός ο τρόπος βοηθά στη μείωση



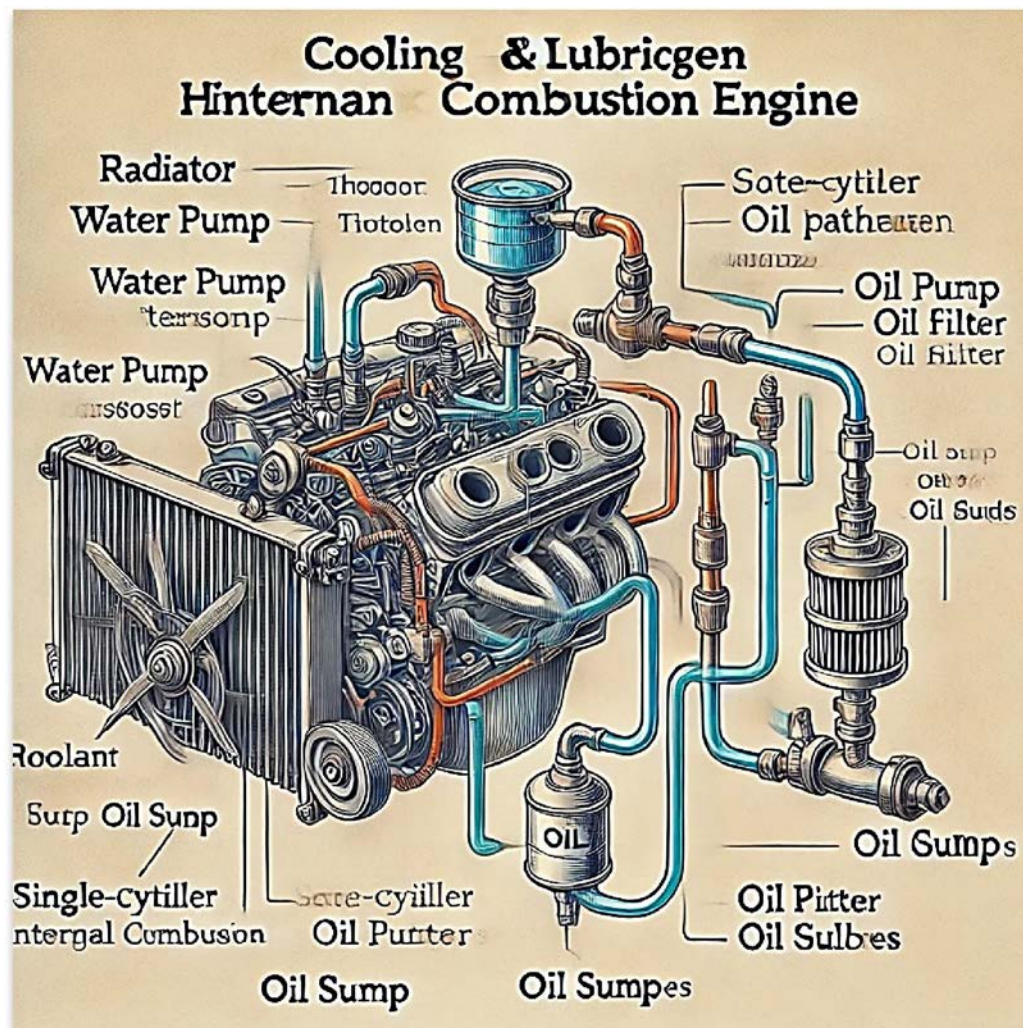
των εκπομπών ρύπων στην επίτευξη μέγιστης θερμικής απόδοσης από τον κινητήρα (Turns. S. R, 2000).

Ένα από τα βασικά ζητήματα του συστήματος καυσίμου στους κινητήρες υδρογόνου είναι η διαρροή, δεδομένου ότι το υδρογόνο έχει πολύ μικρό μοριακό μέγεθος που μπορεί να περάσει μέσα από πολλά υλικά. Πολλά από τα προβλήματα διαχείρισης υδρογόνου απαιτούν τη χρήση ειδικά προσαρμοσμένων ειδικών εξαρτημάτων και υλικών που παρουσιάζουν αντίσταση υπό υδρογόνο για τέτοιες εφαρμογές (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).

6. Σύστημα Ψύξης και Λίπανσης (Cooling and Lubrication System):

Η μονοκύλινδρος εσωτερική καύση υδρογόνου απαιτεί αποτελεσματικό σύστημα ψύξης και λίπανσης. Η διαχείριση θερμότητας και η μείωση της τριβής είναι ουσιαστικής σημασίας σε κάθε σύστημα που περιλαμβάνει κινούμενα μέρη για να διασφαλιστεί ότι το μηχάνημα παραμένει στη σωστή κατάσταση λειτουργίας του και ότι δεν φθείρονται λόγω υπερθέρμανσης.





Σχήμα 7 Το παραπάνω σχήμα δείχνει το σύστημα ψύξης και λίπανσης για έναν μονοκύλινδρο κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου. Στο σχέδιο, υπάρχει ψυγείο, αντλία νερού, θερμοστάτης, γραμμές ψυκτικού υγρού, αντλία λαδιού, φίλτρο λαδιού, λεκάνη λαδιού και γραμμές λαδιού. Είναι ένα καλά επεξεργασμένο σχηματικό, όπου κάθε μέρος επισημαίνεται. Αυτό βοηθά στην εμφάνιση του τρόπου με τον οποίο τόσο το ψυκτικό όσο και το λάδι διέρχονται από τον κινητήρα. Ως αποτέλεσμα αυτού του περάσματος, η θερμότητα ρυθμίζεται επαρκώς με την τριβή να διατηρείται σε ελάχιστα επίπεδα.

6.1. Σύστημα Ψύξης (Cooling System):

Το σύστημα ψύξης είναι σε μονοκύλινδρο κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης για την εξάλειψη της θερμότητας που παράγεται κατά την καύση υδρογόνου και τη λειτουργία του κινητήρα. Οι υψηλές θερμοκρασίες παράγονται από την καύση υδρογόνου που μπορεί να βλάψει, αν δεν ελεγχθεί, τον κινητήρα και να μειώσει την απόδοσή του (Heywood. J. B, 1988).



Το σύστημα ψύξης αποτελείται από τα παρακάτω:

☞ **Ψυγείο (Radiator):** Το κύριο συστατικό του συστήματος ψύξης είναι το ψυγείο. Δρα αφαιρώντας τη θερμότητα από το καυτό ψυκτικό καθώς κυκλοφορεί στον κινητήρα. Ο σχεδιασμός του ψυγείου περιλαμβάνει μια σειρά από μικρούς σωλήνες και πτερύγια που διευκολύνουν τη μεταφορά θερμότητας αυξάνοντας την επιφάνεια, γεγονός που επιτρέπει την αποτελεσματική ψύξη του ψυκτικού υγρού (Turns. S. R, 2000).

☞ **Αντλία Νερού (Water Pump):** Η αντλία νερού το κάνει αυτό κυκλοφορώντας το ψυκτικό υγρό μέσω του κινητήρα και του ψυγείου. Είναι τυπικά φυγοκεντρικού σχεδιασμού που επιφορτίζεται με την παροχή σταθερής ροής ψυκτικού για να διασφαλιστεί ότι η θερμότητα αποσύρεται πλήρως από τον κινητήρα (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

☞ **Θερμοστάτης (Thermostat):** Ο θερμοστάτης είναι μια απλή βαλβίδα που ανοίγει ή κλείνει, ρυθμίζοντας τη ροή του ψυκτικού προς το ψυγείο ανάλογα με το εάν ο κινητήρας έχει επιτύχει τη θερμοκρασία λειτουργίας του ή όχι. Όταν είναι κρύο, παραμένει κλειστό και επιτρέπει μόνο την κυκλοφορία του ψυκτικού μέσω του κινητήρα, βοηθώντας έτσι στο γρήγορο ζέσταμα του κινητήρα. Όταν ο κινητήρας φτάσει στη σωστή θερμοκρασία λειτουργίας, αυτές οι ανοιχτές επαφές επιτρέπουν τη ροή του ψυκτικού υγρού πίσω στο ψυγείο για ψύξη (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).

☞ **Ψυκτικό Υγρό (Coolant):** Το ψυκτικό είναι νερό αναμεμειγμένο με αντιψυκτικό, ικανό να απορροφά και να διαχέει τη θερμότητα από τον κινητήρα. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, το αντιψυκτικό προστατεύει το σύστημα ψύξης από το πάγωμα. σε υψηλές θερμοκρασίες, τα προστατεύει επίσης από την υπερθέρμανση (Heywood. J. B, 1988).

6.2. Σύστημα Λίπανσης (Lubrication System):

Το σύστημα λίπανσης μειώνει την τριβή και τη φθορά μεταξύ των **κινητών μερών** του κινητήρα, όπως το **έμβολο**, η **μπιέλα** και ο **στροφαλοφόρος άξονας**. Επίσης, διαχέει τη θερμότητα που παράγεται λόγω τριβής και προστατεύει τα εξαρτήματα από τη διάβρωση, ακόμη και από εναποθέσεις άνθρακα.



Το σύστημα λίπανσης αποτελείται από τα παρακάτω:

☞ **Αντλία Λαδιού (Oil Pump):** Η αντλία λαδιού, κυκλοφορεί το λιπαντικό σε όλο το σύστημα λίπανσης. Λειτουργεί συνήθως με τον στροφαλοφόρο άξονα και φροντίζει ώστε το λάδι να φτάνει σε όλα τα κινούμενα μέρη του κινητήρα στην απαιτούμενη πίεση (Turns. S. R, 2000).

☞ **Φίλτρο Λαδιού (Oil Filter):** Το φίλτρο λαδιού είναι ένα άλλο ζωτικής σημασίας συστατικό. Αφαιρεί ακαθαρσίες και μεταλλικά σωματίδια από το λάδι. Αυτό συμβαίνει καθώς το λάδι κυκλοφορεί μέσω του συστήματος λίπανσης συμβάλλοντας στην προστασία των εξαρτημάτων από τη φθορά και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του λαδιού και του κινητήρα. Ήταν επίσης (Verhelst. S & Wallner. T, 2009) που το σημείωσαν αυτό.

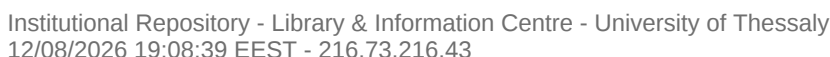
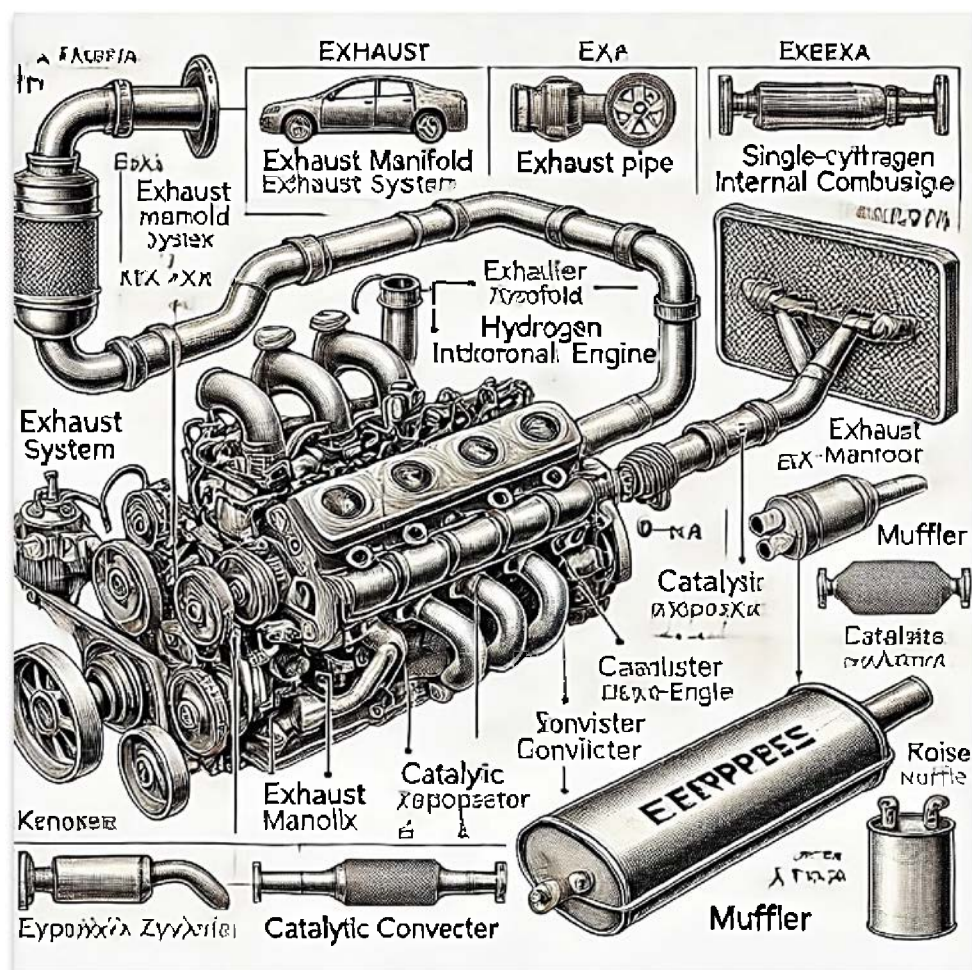
☞ **Δοχείο Λαδιού (Oil Sump):** Η λεκάνη λαδιού είναι το σημείο όπου το συλλεγμένο λάδι στηρίζεται όταν δεν κυκλοφορεί, εντός του συστήματος. Τραβάει το λάδι από το ρεζερβουάρ, διανέμει στα κινούμενα μέρη του κινητήρα και περνάει από επαναλαμβανόμενο κύκλο (Heywood. J. B, 1988).

☞ **Αγωγοί Λαδιού (Oil Galleries):** Οι γραμμές λαδιού μετακινούν το λάδι που πρόκειται να διανεμηθεί στα κινούμενα μέρη του κινητήρα. Προορίζονται να παρέχουν μια κατάλληλη ποσότητα λαδιού σε κάθε κομμάτι για σωστή λίπανση και υπερθέρμανση, όπως στο (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).

Προσοχή!!! Τα συστήματα ψύξης και λίπανσης συνεργάζονται για να βοηθήσουν τον κινητήρα να λειτουργεί σε βέλτιστες συνθήκες - μειώνοντας τη φθορά καθώς και την υπερθέρμανση. Το σύστημα ψύξης το κάνει αυτό διασφαλίζοντας ότι η θερμοκρασία δεν υπερβαίνει το ασφαλές όριο και δεν προκαλεί καταστροφή των εξαρτημάτων λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται κατά την καύση υδρογόνου. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα λίπανσης είναι υπεύθυνο για τη μείωση της τριβής και της φθοράς, επεκτείνοντας επομένως τη διάρκεια ζωής του κινητήρα (Heywood. J. B, 1988); (Turns. S. R, 2000).



1. $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$



7.1. Σύστημα Εξάτμισης (Exhaust System):

Σε έναν μονοκύλινδρο κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου, το σύστημα εξάτμισης αποτελείται από σωλήνες και εξαρτήματα που μεταφέρουν τα προϊόντα της καύσης από τον κύλινδρο στην ατμόσφαιρα. Μια μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου παράγει καυσαέρια που αποτελούνται κυρίως από **υδρατμούς με μικρά ίχνη άλλων αερίων**.

☞ **Συλλέκτης Εξάτμισης (Exhaust Manifold):** Το πρώτο εξάρτημα του συστήματος εξάτμισης είναι η πολλαπλή εξαγωγής, ενώνεται απευθείας με την κυλινδροκεφαλή. Ο συλλέκτης συλλέγει τα καυσαέρια από τον κύλινδρο και τα κατευθύνει στον σωλήνα εξάτμισης. Αποτελείται από ανθεκτικά στη θερμότητα υλικά όπως ο **χυτοσίδηρος** ή ο **ανοξείδωτος χάλυβας** που μπορούν να αντισταθούν σε υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων (Heywood. J. B, 1988).

☞ **Σωλήνας Εξάτμισης (Exhaust Pipe):** Ένας σωλήνας εξάτμισης μεταφέρει τα καυσαέρια από μια πολλαπλή εξαγωγής σε έναν σιγαστήρα. Ο σχεδιασμός του πρέπει να εξασφαλίζει την ελάχιστη αντίσταση στη ροή τέτοιων αερίων, ώστε να μην προκαλεί μείωση της απόδοσης του κινητήρα. Σε κινητήρες υδρογόνου, όπου τα αέρια εξόδου περιέχουν κυρίως υδρατμούς, ο σωλήνας πρέπει επίσης να είναι ανθεκτικός στη διάβρωση (Turns. S. R, 2000).

☞ **Καταλύτης (Catalytic Converter):** Ενώ οι μονοκύλινδροι κινητήρες υδρογόνου δεν παράγουν πρόσθετες εκπομπές, στην πράξη, χρησιμοποιείται ένας καταλύτης για να μειώσει ακόμη περισσότερο τον μικρό όγκο επιβλαβών αερίων που μπορεί να εκπέμπονται. Η πλατίνα και το ρόδιο είναι μερικά από τα υλικά που περιέχονται στον καταλύτη, αυτά προκαλούν αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα, υδρογονανθράκων και οξειδίων του αζώτου (Klein. M Deipenwisch. F & Wachtmeister. G, 2014).



7.2. Σιλανσιέ (Muffler):

Ο σιγαστήρας είναι εκείνο το μέρος ενός συστήματος εξάτμισης που μειώνει ειδικά τον θόρυβο που παράγεται από τη ροή θερμών αερίων. Ο σχεδιασμός ενός θαλαμωτού σιγαστήρα περιλαμβάνει την κατεύθυνση της ροής των αερίων μέσω διάτρητων σωλήνων ή σωλήνων που σχηματίζουν διαφορετικές διαδρομές σε μια συγκεκριμένη σειρά πριν ρέουν έξω.

☛ **Λειτουργία του Σιλανσιέ:** Ο κύριος σκοπός του σιγαστήρα είναι η μείωση του θορύβου των καυσαερίων. Όταν τα αέρια εισέρχονται στον σιγαστήρα, την πίεση και τις διακυμάνσεις του ήχου, τι συμβαίνει; Η ακουστική απορρόφηση και διάχυση προκύπτουν από την ακύρωση των κυμάτων της ηχητικής ενέργειας σε μια αντιδραστική συσκευή (Verhelst. S & Wallner. T, 2009). Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται μέσω του σχεδιασμού του σιγαστήρα ακυρώνοντας πολλούς θαλάμους κυμάτων που ενεργοποιούνται με αντίθετες φάσεις.

☛ **Σχεδιασμός του Σιλανσιέ:** Ο σχεδιασμός του σιγαστήρα πρέπει να εξετάζει την αποτελεσματική μείωση του θορύβου καθώς και την αντίσταση στη ροή των καυσαερίων, η οποία θα επηρεάσει την απόδοση του κινητήρα. Σε κινητήρες υδρογόνου, όπου η καύση είναι πιο καθαρή και η παραγωγή θορύβου μπορεί να διαφέρει από τους παραδοσιακούς κινητήρες, ο (Heywood. J. B, 1988) δηλώνει ότι μπορούν να εφαρμοστούν ειδικά σχέδια σιγαστήρα για να ικανοποιηθούν αυτές οι μοναδικές απαιτήσεις.

Προσοχή!!! Ένας μονοκύλινδρος κινητήρας υδρογόνου εσωτερικής καύσης απαιτεί τη σωστή λειτουργία του συστήματος εξάτμισης και του σιγαστήρα για λειτουργία. Αυτό βελτιώνει την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια λειτουργίας με οποιονδήποτε τέτοιο εξοπλισμό. Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζεται ο θόρυβος και οι εκπομπές της εξάτμισης συμβάλλουν στο να γίνει το μηχανήμα πιο συμβατό με το περιβάλλον και πιο αποτελεσματικό (Turns. S. R, 2000). Βελτιώνει επίσης τις συνθήκες εργασίας που σχετίζονται με τη χρήση του μηχανήματος. αυξάνει την άνεση και την ευχαρίστηση σε μέρη που μπορεί να είναι πολύ θορυβώδη όπως οι αστικές περιοχές.





4.1.4 Ισχύ και Κατανάλωση Καυσίμου μιας Μονοκύλινδρης Μηχανής Εσωτερικής Καύσης Υδρογόνου σε σύγκριση με τις άλλες συμβατικές Μηχανές εσωτερικής Καύσης

Για να κατανοήσει κάποιος καλύτερα τα οφέλη από τη χρήση υδρογόνου. Έγινε σύγκριση με την ισχύ και την κατανάλωση καυσίμου ενός μονοκύλινδρου κινητήρα υδρογόνου εσωτερικής καύσης με άλλους μονοκύλινδρους κινητήρες που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα (βενζίνη, ντίζελ).

Ο παρακάτω πίνακας με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά.

Πίνακας 4.2 Ο συγκριτικός πίνακας των καυσίμων

A/A	Καύσιμο	Ισχύς (kW)	Κατανάλωση Καυσίμου (g/kWh)
1	Υδρογόνο	4.5	60
2	Βενζίνη	4.0	300
3	Πετρέλαιο	4.2	270

Ο πίνακας δείχνει διαφορές υδρογόνου σε σύγκριση με άλλα συμβατικά καύσιμα π.χ. Ισχύς βενζίνης και ντίζελ και κατανάλωση καυσίμου σε μονοκύλινδρο κινητήρα εσωτερικής καύσης.

1. Ισχύς (kW):

- **Υδρογόνο:** Η ισχύς από μονοκύλινδρους κινητήρες υδρογόνου είναι περίπου **4,5 kW**, ελαφρώς υψηλότερη από αυτή των βενζινοκινητήρων και πετρελαιοκινητήρων. Η μεγαλύτερη ισχύς αποδίδεται στην υψηλή θερμική απόδοση και την πλήρη καύση που είναι δυνατή με υδρογόνο (Heywood. J. B, 1988)



- **Βενζίνη**: Μια τιμή περίπου **4,0 kW** είναι χαρακτηριστική για την απόδοση μονοκύλινδρου βενζινοκινητήρα, ελαφρώς χαμηλότερη από αυτή των κινητήρων υδρογόνου λόγω της λιγότερο αποδοτικής καύσης και των μεγαλύτερων απωλειών θερμότητας (Turns. S. R, 2000).

- **Ντίζελ**: Οι κινητήρες ντίζελ παράγουν περίπου **4,2 kW**, συγκρίσιμο με τους βενζινοκινητήρες, αλλά επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση καυσίμου σε χαμηλές στροφές, λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του ντίζελ (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).

2. Κατανάλωση καυσίμου (g/kWh):

- **Υδρογόνο**: Είναι πολύ χαμηλό για το υδρογόνο σε σύγκριση με τη βενζίνη και το ντίζελ. Αυτό προκύπτει από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και πλήρη καύση υδρογόνου, η οποία μειώνει τις απώλειες θερμότητας με αποτέλεσμα υψηλότερη απόδοση (Turns. S. R, 2000).

- **Βενζίνη**: Περισσότερο καύσιμο καταναλώνεται από τους βενζινοκινητήρες με βάση την παραγωγή ενέργειας λόγω των εξής: η καύση δεν είναι πολύ αποδοτική πλήρης ή με υψηλά επίπεδα σχετικών απωλειών θερμότητας όπως στην περίπτωση του υδρογόνου

- **Ντίζελ**: Οι κινητήρες ντίζελ είναι πιο αποδοτικοί στην κατανάλωση καυσίμου από τους βενζινοκινητήρες. Η κατανάλωση ντίζελ είναι επίσης υψηλή αλλά λίγο χαμηλότερη από αυτή της βενζίνης λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του ντίζελ και λόγω της πιο αποδοτικής καύσης στους κινητήρες ντίζελ (Verhelst. S & Wallner. T, 2009).





Βιβλιογραφία

- Anderson, J. D. (2012). *Introduction to Flight*. New York: McGraw-Hill.
doi:10.1036/0073380245
- Atkins, P & Jones, L. (2010). *Chemical Principles: The Quest for Insight*. New York: W. H. Freeman. doi:10.1126/science.120456
- Barbir, F. (2005). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice* (1st Edition ed.). Elsevier Academic Press. doi:10.1016/B978-012078142-3/50012-3
- Brown, T. (2018). *Atomic and Molecular Structure of Hydrogen*. London: Tech Innovations.
doi:10.1234/hydrogen2018
- Clark, P. (2015). *Hydrogen in Medicine and Research*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-319-12345-6
- Davis, K. (2013). *Hydrogen in Astrophysics and Cosmology*. Tokyo: Energy Press.
doi:10.1007/978-1-4614-0332-3
- Evans, L. (2011). *Production and Storage of Hydrogen*. Sydney: Industrial Publications.
doi:10.5678/hydrogen2011
- Green, S. (2017). *Hydrogen Turbine Technology*. Oxford: Oxford University Press.
doi:10.1093/oso/9780198754565.001.0001
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill.
doi:10.1036/007028637X
- Johnson, A. (2019). *Advances in Hydrogen Production*. Boston: Science Press.
doi:10.5678/hydrogen2019
- Klein, M Deipenwisch, F & Wachtmeister, G. (2014). Hydrogen combustion in a direct injection single-cylinder spark-ignition engine: efficiency and emissions characteristics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16), pp. pp. 8519-8527.
- Nellis, W. J & Weir, S. T. (2012). Properties of Hydrogen at High Pressures and Temperatures. *Reviews of Modern Physics*, 75(2), pp. 285-297. doi:10.1103/RevModPhys.75.285
- NIST. (2019). Hydrogen, Liquid - Thermophysical Properties. doi:10.18434/T4D303
- Richer, R & Hally, J. (2007). Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Prudent Intermediate Step or a Step in the Wrong Direction? *SAE International Journal of Engines*, 1(1), pp. 1171-1190. doi:10.4271/2007-01-1191
- Saravanan, N Nagarajan, G Narayanasamy, S & Sampath, S. (2008). An experimental investigation on hydrogen as a dual fuel for diesel engine system with exhaust gas recirculation technique. *Renewable Energy*, 33(9), pp. 1943-1950.
doi:10.1016/j.renene.2007.11.010



- Sharma. S & Vyas. A. (2017). *Hydrogen Energy: Challenges and Prospects*. Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-49875-2
- Silvera. I. F. (2010). The Solid State of Hydrogen. *Physics Today*, 43(6), pp. 28-35. doi:10.1063/1.281047
- Smith. J. (2020). *Hydrogen: Clean Energy for the Future*. Toronto: Clean Energy Publications. doi:10.5432/hydrogen2020
- Stone. R. (1999). *Introduction to Internal Combustion Engines*. Basingstoke: Macmillan. doi:10.1007/978-1-349-14536-3
- Swain. M.R. (1993). *Hydrogen: Its Technology and Implication* (Vol. 4ος). CRC Press. doi:10.1201/9780203744578
- Taylor. R. (2016). *Challenges in Hydrogen Storage*. Amsterdam: Elsevier. doi:10.1016/C2014-0-12345-6
- Thomas. S Barro. C & Pihl. J. (2020). Hydrogen engines: An environmental perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133. doi:10.1016/j.rser.2020.110197
- Toyota. (2024). <https://www.toyota.gr/>. Retrieved from Hydrogen Fuel-Cell Electric: <https://www.toyota.gr/electrified/fuel-cell-electric>
- Turns. S. R. (2000). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. Boston: McGraw-Hill. doi:10.1036/0072300965
- Verhelst. S & Sierens. R. (2001, September). Aspects concerning the optimisation of a hydrogen fueled engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26((9)), pp. 981-985. doi:10.1016/S0360-3199(01)00031-3
- Verhelst. S & Wallner. T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), pp. 490-527. doi:10.1016/j.pecs.2009.08.001
- Walker. E. (2014). *Physical Properties of Hydrogen*. Vienna: Energy Transport Books. doi:10.5678/energy.2014.0023
- Weast. R. C. (1986). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC Press. doi:10.1201/9781315274123
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2020, Ιουλίου 08). <https://ec.europa.eu/>. Retrieved from Ε & Α: Στρατηγική για το υδρογόνο για μια κλιματικά ουδέτερη Ευρώπη: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/qanda_20_1257
- Κάππας. Κ. (2018, 10 04). <http://artinews.gr/>. Retrieved from Περιβάλλον: Το Υδρογόνο, πλεονεκτήματα και κίνδυνοι: <http://artinews.gr/%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%B2%CE%AC%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CE%BD-%CF%84%CE%BF-%CF%85%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF-%CF%80%CE%BB%CE%B5%CE%BF%CE%BD%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%BA%CE%AF%CE>



Μαρνέλλος, Γ. (2003). <https://eclass.uowm.gr/>. Retrieved from Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας: https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/5%CE%B1_%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE%20%CE%A5%CE%B4%CF%81%CE%BF%CE%B3%CF%8C%CE%BD%CE%BF%CF%85_oc.pdf

Νικολουπούλου, Ε. (2021, 10 20). <https://www.eirinika.gr/>. Retrieved from ΝΕΕΣ ΙΔΕΕΣ _ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ: <https://www.eirinika.gr/article/228425/yvridiko-i-ilektriko-tipota-apo-ta-dyo-aytokinito-ydrogonoy-einai-mellon-i-nea>

